



Pro gradu -tutkielma
Fysiikan opettaja suuntautumisvaihtoehto

Yliopisto-opiskelijoiden käsitykset kvanttifysiikan
ontologisesta rakenteesta ja kvanttiolio- ontologioista

Nicholas Grigoriadis

30.11.2017

Ohjaajat: Professori Ismo Koponen ja dos. Maija Nousiainen
Tarkastajat: Professori Ismo Koponen ja dos. Maija Nousiainen

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto

HELSINGIN YLIOPISTO HELSINGFORS UNIVERSITET – UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Laitos Institution Department Fysiikan laitos	
Tekijä Författare Author <u>Nicholas</u> Tony Christian Grigoriadis			
Työn nimi Arbetets title Title Yliopisto-opiskelijoiden käsitykset kvanttifysiikan ontologisesta rakenteesta ja kvanttiolio- ontologioista			
Oppiaine Läroämne Subject Fysiikka			
Työn laji Arbetets art Level Pro-gradu -työ		Aika Datum Month and Year 30.11.2017	
		Sivumäärä Sidoantal Number of Pages 52 + 5	
Tiivistelmä Referat Abstract			
<p>Tämän tutkimuksessa tarkastellaan yliopisto-opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikan ontologisesta rakenteesta ja taipumuksia jäsentää kvanttifysiikan käsitteellistä ainesta. Opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikasta hahmotettiin opiskelijoiden ilmaisemien kvanttiolio-ontologioiden kuvauksien kriittisen arvioinnin kautta.</p> <p>Fysiikan opetuksen tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita siitä, millä tavalla opiskelijat jäsentävät fysiikan erilaiset käsitteelliset kokonaisuudet ja millaisia nämä kokonaisuudet ovat laadultaan. Fysiikan opetuksen järjestelyjä on kritisoitu siitä, että ne kiinnittävät paljon huomiota fysiikan laskennalliseen puoleen, kun taas käsitteellisten ymmärryksen tukeminen jää vähemmälle huomiolle. Aiemmat tutkimukset osoittavat tämän taipumuksen vaivaavan erityisesti kvanttifysiikan opetuksen järjestämistä. Opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikan ontologisesta sisällöstä arvioidaan Balibarin ja Levý-Leblondin esittämän fysiikan ontologisten ominaisuuksien kategorisaatioiden mukaan. Opiskelijoiden käsityksiä kvanttiolio-ontologioista verrataan muutamaaan Kiddin esittämään historiallis-tieteelliseen –malliin. Opiskelijoiden mallien mielekkyyttä edelleen arvioidaan suhteessa näihin tunnettuihin malleihin.</p> <p>Tutkimus toteutettiin verkkokyselytutkimuksena fysiikkaa pää -ja sivuaineena opiskeleville henkilöille eri opintojen eri vaiheissa. Kysely teetettiin opiskelijoille, jotka suorittivat perus -ja aineopintotason kvanttifysiikan kursseja. Vastaajista valtaosa oli matemaattisia luonnontieteitä pääaineena opiskelevia. Analysoitujen vastausten lukumäärä oli 143. Aineiston analyysissä hyödynnettiin ontologisten ominaisuuksien mielekkyyttä mittaavia erityisiä operationalisoituja tunnuslukuja. Aineiston analyysissä hyödynnettiin eksploratiivista ja konfirmatorista faktorianalyysiä perinteisen tunnuslukuanalyysin tukena.</p> <p>Tutkimus osoittaa opiskelijoiden olevaan kykeneviä tunnistamaan historiallis-tieteellistä kvanttiolio-ontologia –malleista ainoastaan klassisen fysiikan hiukkasantologian. Tämän lisäksi merkittävä enemmistö opiskelijoista ei osoittanut kykenevänsä soveltamaan muita opetuksessa käytettäviä kvanttiolio-ontologia –malleja johdonmukaisesti. Tämän lisäksi tutkimus osoittaa suurimman osan opiskelijoista ymmärtävän ambivalentisti tiettyjä kvanttifysiikan ontologisia ominaisuuksia, joista merkittävimmät ovat olion lokaalius ja olemassaolo ontologisina kategorioina. Myös tietyt kvanttifysiikan käsitteet, erityisesti Heisenbergin epätarkkuusperiaate, eivät jäsentyneet mielekkäänä osana opiskelijoiden ilmaisemaa kuvaa kvanttifysiikan ontologisesta rakenteesta.</p>			
Avainsanat Nyckelord Keywords Kvanttifysiikka – ontologia – fysiikan käsite rakenteet - kvanttifysiikan opetuksen tutkimus – kvanttiolio-ontologia - ontologinen ominaisuus - faktorianalyysi – tieteenfilosofia – mallit			
Säilytyspaikka Förvaringställe Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto, Kumpulan kampuskirjasto,			
Muuta tietoja Övriga uppgifter Additional information			

Sisältö

1. Johdanto.....	1
2. Kvanttifysiikan tieteenfilosofinen perusta.....	7
2.1. Ontologian rooli fysikaalisissa teorioissa.....	7
2.2 Kvanttifysiikan ontologinen rakenne.....	11
2.3 Kvanttifysiikan tulkinnan vaikutus ontologisiin rakenteisiin.....	17
3. Kvanttifysiikka opetuksen ja oppimisen haasteena.....	21
3.1. Fysiikan opetuksen tutkimuksen taustaa	21
3.2. Kvanttifysiikan opetuksen tutkimus.....	22
3.2.1. Kvanttifysiikan opetuksen sisällöllisiä haasteita.....	23
4. Tutkimusasetelma.....	26
4.1. Tutkimuskysymykset.....	26
4.2. Aineisto ja tutkimuksen kulku.....	28
4.3. Ontologisten elementtien operationalisointi.....	29
4.4. Kvanttiolio-ontologiamallien luokittelu.....	30
4.5 Faktorianalyysi.....	31
5. Tulokset.....	33
5.1. Ontologisten ominaisuuksien mielekkyydet.....	33
5.1.1. Ontologisten ominaisuuksien mielekkyyden tunnusluvut.....	34
5.2. Faktorianalyysin tulokset.....	37
5.2.1. Faktorien nimeäminen ja tulkinta.....	37
5.2.2. Historiallis-tieteellisten olio-ontologiamallien mielekkyydet.....	43

5.3. Kyselylomake.....	44
6. Johtopäätökset.....	46
Viitteet.....	49
Liite A: Kyselylomake.....	52

1. Johdanto

Kvanttifysiikka on keskeinen fysiikan teoria ja on kiistatta 1900-luvun vaikuttavimpia älyllisiä tuotoksia. Sen merkitystä luonnontieteissä luonnon kuvaajana ja työkaluna ei voida korostaa tarpeeksi. Sillä on ollut valtavia mullistavia vaikutuksia paitsi fysiikan perustutkimuksessa, myös lukuisissa sitä soveltavissa tieteissä kuten kemiassa, lääketieteessä ja tekniikassa.

Tieteellisessä maailmankuvassa kvanttifysiikalla on keskeinen rooli luonnon mikromaailman olioiden ja lainalaisuuksien jäsentäjä. Lukemattomat luonnonilmiöt edellyttävät kvanttifysikaalista selitystä niin solun kuin koko universumin mittakaavoja koskevissa teorioissa. Tietyssä merkityksessä voidaan suorastaan sanoa ns. kvantti -hypyn tuottaneen ihmiskunnan historian erään kumouksellisimman tieteellisen, taloudellisen ja yhteiskunnallisen muutoksen. Moderni elektroniikka, tietokoneet, matkapuhelimet ja lääketieteelliset kuvantamislaitteet ovat vain eräitä esimerkkejä niistä merkittävistä innovaatioista, jotka ovat vasta kvanttifysiikan myötä tulleet teknisesti toteutettaviksi. Kvanttifysiikan roolin niin tekniikan kuin luonnontieteiden alalla yleensä, on itsestäänselvää että kvanttifysiikan asiantuntijoiden kysynnän tarve yhteiskunnassa säilyy myös lähitulevaisuudessa. Kvanttifysiikan koulutusta tarvitsevat paitsi fyysikot myös insinöörit, kemistit, biologit ja lääketieteen tutkijat.

Kvanttifysiikan keskeisestä merkityksestä huolimatta se koetaan fysiikan osa-alueena älyllisesti haastavana. Tämän mielikuvan hälventämistä ei auta, että ei-asiantuntijoille kvanttifysiikasta puhutaan usein suorastaan esoteeriseen sävyyn, ikäänkuin kvanttifysiikka olisi perustavanlaatuisesti inhimillisen ymmärryksen ulottumattomissa [1][2].

Siihen, että onko kvanttifysiikka todellisuudessa vaikeatajuista, vai kuvataanko se sellaiseksi ei ole selkeää vastausta. Vertailukohdaksi voidaan nostaa muiden tieteenalojen keskeisiä teorioita, kuten DNA -ja evoluutioteoria biologiasta. Kenen tahansa valveutuneen nykyaikaisen yhteiskunnan edustajan odotetaan tietävän joitakin perusasioita DNA:sta, evoluutiosta ja perinnöllisyydestä. Kvanttifysiikan tuntemista kohtaan odotukset eivät jostain syystä ole samanlaiset, vaikka inhimillisen luonnontieteellisen ymmärryksen kannalta kvanttifysiikka on vähintäänkin yhtä merkittävä kuin kumpi tahansa edellisistä teorioista [3]. Yhteiskunnan rakenteen tasolla kvanttifysiikka taas on ollut ja on kiistattomasti vaikuttavampi, mutta teorian tunnettavuuden kannalta tälläkään vaikuta olevan merkitystä.

Myöskään fysiikan asiantuntijoiden piirissä kvanttifysiikan mystifiointi ei ole tavatonta. Useat fysiikkaa opiskelleet ovat kuulleet Richard Feynmannin kuuluisan lainauksen hänen teoksestaan *The Character of Physical Law* hänen kirjoituksestaan kvanttifysiikan luonteesta [4]:

“...On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics... I am going to tell you what nature behaves like. If you will simply admit that maybe she does behave like this, you will find her a delightful, entrancing thing. Do not keep saying to yourself... But how can it be like that?' because you will get 'down the drain', into a blind alley from which nobody has yet escaped. Nobody knows how it can be like that.”

Lainausta ei kuitenkaan ole hyödyllistä tulkita liian kirjaimellisesti. Asiantuntijatasolla kvanttifysiikan standardikäsitetyksessä ei nimittäin ole merkittävää epäselvyyttä sen suhteen mistä kvanttifysiikassa on kysymys. Kvanttifysiikan formuloinnista, käsitteellisestä sisällöstä, laeista ja miten lainalaisuudet ilmenevät luonnossa sekä teorian merkityksestä ollaan sen keskeisiltä osilta yhteisymmärryksessä.

Feynmannin huomio kohdistuuakin syvemmälle kuin mihin fysiikan huomio luonnontieteenä keskittyy. Huomio viittaa siihen miten kvanttifysiikkaa ja sen vaikutuksen alaisia ilmiöitä ymmärretään metafysiikan tasolla. Feynmann ei väitä etteikö olisi olemassa kyvykkäitä kvanttifysiikan taitajia, jotka hallitsisivat kvanttifysiikan formaalin rakenteet sekä osaisivat navigoida sen haastavien lakien ja käsitteiden vaikeakulkuisella merellä. Hän ei myöskään kysy miten kvanttifysiikan avulla voitaisiin kuvata luonnonilmiöitä, sillä tämä teorian tavoite täyttyy. Hän menee askeleen pidemmälle ja kysyy *miksi* luonto on sellainen, että se noudattaa juuri kvanttifysiikan lakeja.

Kysymys siitä miksi kvanttifysiikan antama kuva luonnosta on sellainen kuin se on ei ole kovin mielekäs perustavanlaatuisen fysiikan piirissä. Fysiikka toki tutkii *miten* luonto toimii, mutta kysymys *miksi* luonto on juuri sellainen kuin se on kuuluu pohjimmiltaan metafysiikan piiriin. Ontologiassa tällä kysymyksellä on merkitystä. Vaikka kysymys ei olekaan välttämättä fysikaalinen, on se virittänyt kvanttifysiikan historian saatossa paljon keskustelua ja ajatuksia niin fyysikoiden kuin filosofien keskuudessa, näin edelleen muokaten sitä, miten teoria sekä sen ja luonnon välinen todellisuussuhde ymmärretään.

Kvanttifysiikka on sellainen fysiikan osa-alue, jonka fysiikan opiskelijat mieltävät usein paitsi formalistisesti, niin erityisesti käsitteellisesti haastavana [3]. Kvanttifysiikan oppimista tutkimalla on havaittu, että kvanttifysiikkaa opiskelevilla on merkittäviä puutteita melkein kaikilla fysiikan osaamisen osa-alueilla: ongelmanratkaisussa, käsitteiden ja ilmiöiden selittämisessä sekä opitun soveltamisessa

reaalimaailman tilanteisiin [3][5][6]. Havainto on hälyttävä, sillä opetusta muuttamatta kyseinen opetuksen kehityssuunta vaikuttaa lähinnä vahvistavan kvanttifysiikkaan liittyvää epävarmuutta ja teorian irrallisuutta [3].

Eräs fysiikan opetuksen tutkimuksen keskeisiä haasteita on kvanttifysiikan käsitteiden hahmottamisen ymmärtäminen. Kvanttifysiikan perusopetuksessa entistä suuremman painon tulisi olla juuri käsitteellisen ja ontologisen jäsentyneisyyden takaamisessa sekä erilaisten mallien episteemisen luonteen tunnistamisessa [3]. Niin lukio- kuin yliopistotasolla kvanttifysiikan opiskelua lähestytään oletusarvoisesti klassisen fysiikan kautta, sen tarjoamien mallien ja ontologisen rakenteen ehdoilla. Tämä ilmenee opetuksessa kuvallisten, erityisesti klassiseen maailmankuvaan kytkettyjen mallien hyödyntämisenä kvanttifysiikan opetuksessa.

Kvanttifysiikan opetuksen tutkimuksen piirissä tällaisten lähestymistapojen käytön on havaittu haittaavan huomattavasti kvanttifysiikan merkityksellistä oppimista [7][8]. Kvanttifysiikan opetuksen ei tulisi olla alisteista ainoastaan sellaisille malleille jotka ovat visualisoitavia tai klassiseen maailmankuvaan rinnastettavissa. Sen erityislaatuksia ja erityispiirteitä tulee käsitellä ilman klassisen ja visualisoitavan fysikaaliseen maailmankuvan velvoittavaa painotaakkaa. Tapa jolla klassisia malleja lainataan kvanttifysiikan opetukseen tulisi olla sellainen joka korostaa mallien instrumentalistista luonnetta, ei niinkään ontologista.

Kvanttifysiikan opetuksessa voidaan nähdä useita erilaisia haasteita. Ensinnäkin käytettävien opetusmallien tulisi olla hyväksyttävä tieteellisten mallien kanssa. Tämä hyväksyttävyys ilmenee paitsi opetusmallin ja tieteellisen mallin formalistisessa muotoilussa, myös niiden ontologisen perusrakenteen sekä teorian mallien -ja tulkintojen vertailukelpoisuudesta. Kvanttifysiikan opetuksen tutkimuksen piirissä on julkaistu lukuisia teoreettisia kvanttifysiikan jäsennostapoja, joihin perustuen on laadittu vastaavia opetuskokeiluja [9]. Tästä huolimatta moniin muihin fysiikan osa-alueisiin, kuten dynamiikkaan ja sähköoppiin verrattuna, opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikan käsitteellisestä sisällöstä on tutkittu verrattain vähän [10]. Erilaisia ehdotuksia järjestää kvanttifysiikan opetus on monia, mutta luotettavaa tutkimustietoa siitä miten opiskelijat jäsentävät kvanttifysiikkaa on vähän.

Opetuskokonaisuuksissa pyritään luomaan sellaisia opetusmalleja, jotka tukevat opiskelijoiden luontaista tapaa käsitteellistää kvanttifysiikkaa. Tällöin tulee myös ottaa huomioon opiskelijoiden tavallisimmat käsitteelliset väärinkäsitykset. Tätä on tutkittu kvanttifysiikan opetuksen piirissä kohtuullisesti [3]. Ymmärtämällä opiskelijoiden tavallisia väärinkäsityksiä tulee mahdolliseksi järjestää opetettavat

kokonaisuudet siten, että opittu olisi verrattavissa tieteellisesti hyväksyttäviin malleihin ja opiskelijoilla olisi mahdollisimman vähän pois opittavaa siirtyessään opiskeluissaan kohti edistyneempiä opetusmalleja.

Kun tarkastellaan kvanttifysiikan opetuksen järjestämistä, huomataan kvanttifysiikan aihekokonaisuuksien järjestyksen olevan liki universaali. Nämä ovat järjestyksessä esikvanttifysiikka, aalto- ja matriisimekaniikka ja viimein kvanttikenttäteoria. Siirryttäessä välivaiheesta toiseen on tunnusomaista, että teorian käsitteellisestä sisällöstä eri asiat korostuvat. Jotkin aikaisemmin korostetut käsitteet ja ominaisuudet siirtyvät taka-alalle, muuttuvat tai katoavat kokonaan.

Filosofian termein voidaan sanoa teorian virittämän ontologisen rakenteen muuttuvan siten, että teorian keskeinen käsitteistö ja tapa tulkita sitä saavat siirtymissä uuden muodon. Kvanttifysiikan opetuksen tutkimuksessa on kiinnitetty huomiota tähän ilmiöön, jossa kvanttifysiikkaa opiskeleva opiskelija joutuu unohtamaan toistuvasti sellaisiakin asioita, joiden omaksumiseen ollaan käytetty huomattavasti aikaa [10]. Tällöin teorian välivaiheet tuntuvat toisiinsa nähden erillisiltä tai suorastaan ristiriitaisilta. Tästä seuraa että välivaiheiden välisen loogisen yhteyden hahmottaminen on opiskelijoille haastavaa.

Kvanttifysiikan perusopetuksessa oppimistavoitteet voidaan asettaa kvalitatiiviselle tasolle, kvanttifysiikan perusperiaatteiden kuvailuun formalistisen tarkastelun sijaan. Tällöin opetuksessa kehitettävillä ontologisilla rakenteilla on keskeinen rooli. Edistyneemmillä kvanttifysiikan kursseilla on tavallista keskittyä kvanttimekaniikan formaalimpiin piirteisiin käsitteellisten aineksen jäsenyyksen jäädessä oppilaan oman harrastuneisuuden, intuition ja aikaisemmilla kursseilla opitun varaan. Tästä ei ole kovin yllättävää huomata, että saatuaan opetusta opiskelijoissa havaitaan edelleen usein epävarmuutta sen suhteen, miten kvanttimekaniikan virittämä perustavanlaatuisen ontologinen rakenne, -ominaisuudet, -oliot, lait tai minkälainen on kvanttimekaniikan erilaisten tulkintojen motivaatio [11].

Pitkäjänteisyyden ja alusta alkaen onnistuneen opetuksen voisi tulkita kvanttifysiikan opetuksen kannalta välttämättömäksi, sillä aikaisemmat tutkimukset osoittavat, että edistyneen kvanttifysiikan opetuksen olevan suhteellisen tehon muuttamaan opiskelijoiden mielikuvia jo perusvaiheessa opittujen ja käyttöön otettujen mallien ontologisista ominaisuuksista, erityisesti mitä tulee oppilaan soveltamaan kvanttiolio-ontologiaan [12]. Se syntyvätkö vaikeasti muuttuvat mallit oppilaiden kognitiivisiin toimintoihin liittyvistä syistä, vai kvanttifysiikan mallien mainitusta erillisyyden tunnusta verrattuna klassisiin tai arkiperäisiin käsityksiin on avoin kysymys.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää millaisia ovat yliopiston fysiikan opiskelijoiden käsitykset kvanttifysiikan virittämästä ontologisesta rakenteesta, erityisesti sen perusolio-ontologioiden

ominaisuuksista ja kvanttifysiikan ilmiöiden ontologisesta luonteesta. Tämä tehdään kyselytutkimuksella, jolla selvitetään millaisia ontologisia ominaisuuksia opiskelijoilla on taipumusta liittää kvanttiolio-ontologiaan. Tällaisen kyselyn suunnittelemiseksi ja hyödyntämiseksi on välttämätöntä arvioida millainen rooli ontologialla yleensä on kvanttifysiikassa. Tässä tutkimuksessa tulkitaan kriittisesti kvanttifysiikan ilmiöiden ja olio-ontologioiden fysikaalisia piirteitä ontologisesta näkökulmasta, jolloin voidaan edelleen operationalisoida kvanttifysiikan käsitteellinen rakenne ontologisen rakenteen mukaan.

Itse kyselyn kysymykset ovat kiinnitettyjä kokeellisesti hahmotettavan elektronidiffraktio - kaksoisrakokokeen viitekehykseen. Tästä viitekehyksestä käsin opiskelijat ottavat kantaa kvanttifysiikan olio-ontologioita ja ilmiöitä koskeviin väittämiin. Kun nähdään millaisia ontologisia ominaisuuksia opiskelijat attribuoivat kvanttiolio-ontologialla on edelleen mahdollista arvioida oppilaiden käsitystä kvanttifysiikan virittämästä ontologisesta rakenteesta.

Opiskelijoiden kvanttifysiikan ontologisen rakenteen käsityksestä saadaan arvokasta tietoa oppimisen ongelmakohdista ja vaikeasti muuttuvista mielikuvista. Ottaen nämä ongelmakohdat huomioon on mahdollista kehittää uusia tapoja järjestää kvanttifysiikan opetus. Tällä tavoin kvanttifysiikan opetusta voidaan kehittää siten, että se tukee kvanttifysiikan käsitteellisen ymmärryksen kehitystä.

Kyselyaineiston analyysissä hyödynnetään kahta erilaista tilastollisia menetelmää. Ensimmäiseksi kyselytutkimuksen aineiston perusteella tuotetaan sisältöanalyysin operationalisoinnin mukaan kehitettyjä ontologisen ominaisuuden mielekkyys (OOM) -tunnuslukuja. Näitä tunnuslukuja hyödyntämällä on mahdollista arvioida paitsi opiskelijoiden ulkokohtaisia vastausstrategioita, myös sisäistettyjä käsityksiä kvanttifysiikasta ja sen ontologisesta rakenteesta.

Tutkimuksessa aineistoon sovelletaan perinteisen tunnuslukuanalyysin lisäksi eksploratiivista -ja konfirmatorista faktorianalyysia. Tämän nimenomaisen menetelmän valinnan syynä on paitsi koetella kokonaisten ontologisten ominaisuuksien ryppäiden mielekkyyttä, myös tunnistaa mahdollisia ulkokohtaisia vastaamiseen liittyviä tekijöitä. Sisältöanalyysissä edelleen pohditaan faktorien ilmentämää kuvaa kvanttifysiikan olio-ontologioiden ja ilmiöiden luonteesta sekä syitä niiden synty miseen. Menetelmä on suhteellisen vähän käytetty fysiikan opetuksen tutkimuksen piirissä, jonka takia sen koetteleminen kyseiselle aineistolle on jo itsessään merkittävää.

Kyselyn aineiston perusteella koetellaan myös joidenkin tiettyjen standardoitujen historiallis-tieteellisten opetusmallien vaikuttavuutta opiskelijoiden vastauksissa. Näin voidaan selvittää,

missä määrin oppilaat omaksuvat opetuksessa käytettäviä opetusmalleja. Itse tutkimuksessa käytettävän kyselyn rakennetta ja tarkoituksenmukaisuutta tällaisen kvanttifysiikan käsitteellistä ymmärrystä mittaavan tutkimuksen hyödyntämisessä arvioidaan. Työstä saatuja tuloksia voidaan sittemmin hyödyntää uudenlaisten kyselyjen suunnittelussa.

2. Kvanttifysiikan tieteenfilosofinen perusta

2.1. Ontologian rooli fysikaalisissa teorioissa

Luonnontieteellisten teorioiden laatiminen irrotettuna selkeästä ontologisesta perustasta on tuskin mahdollista. Kaikessa luonnontieteen tekemisessä lähtökohtana ovat käsitykset luonnon perusolioista ja niiden ominaisuuksista. Näitä olioihin ja niiden ominaisuuksiin liittyviä rakenteita kutsutaan tieteenfilosofian piirissä *ontologioiksi*. Tieteenfilosofisesti ontologia on määritelty tiedonalana, joka tutkii todellisuuden luonnetta ja sen keskeisiä rakenteita [13], mutta ontologia voidaan ymmärtää myös tieteellisen teorian käsitteellisenä viitekehyksen merkityksessä. Ontologia ankkuroi tieteellisen teorian sisältämät oliot sekä niiden luonteenomaiset ominaisuudet. Ontologian voi nähdä teorian käsitteellisenä pohjarakenteena, joka ankkuroi teorian ilmentämän fysikaalisen todellisuuden. Fysiikka tieteenä pyrkii kuvailemaan todellisuuden rakennetta ja luonnetta tutkimalla luonnossa vallitsevia lainalaisuuksia. Tämä tapahtuu juuri kartoittamalla todellisuuden rakennetta selittäviä olioita, niiden ominaisuuksia sekä keskinäistä suhtautumista toisiinsa. Ilman ontologista perustaa fysiikka tieteenä rajoittuisi kuvailemaan ainoastaan havaittavia ilmiöitä vailla kosketuspintaa todellisuuden perimmäiseen rakenteeseen.

Luonnontieteellisen tutkimuksen metodinen painotus on pysynyt 1600-luvun tieteellisestä vallankumouksesta lähtien vahvasti käsitteellis-matemaattisten ja empiirisissä tieteen tekemisen menetelmissä. Nykypäivänä harva kuvittelee enää luonnontiedettä pystyttävän tekävän luonnonfilosofisesta näkökulmasta ilman käsitteellistettyä matemaattista rakennetta, joka perustuu empiiriseen tietoainekseen tai ilmentää havaittavia luonnonilmiöitä. Tästä huolimatta useiden pohjimmiltaan ontologisten periaatteiden nähdään ohjaavan nykyistä luonnontieteellistä tutkimusta erilaisten ennakko-oletusten kautta [14]. Fysiikka poikkeaa keskeisesti muista luonnonfilosofisista suuntauksista sen metodisessa painotuksessa, jossa käsitteellistäminen tehdään formaalisti ja empiirinen tietoaines jäsennetään tämän formaalin käsiterakenteen ehdoilla. Tästä huolimatta fysiikan teoriat perustuvat aina joillekin tietyille teorioiden ilmentämille ontologisille väittämille, jotka luonnehtivat teorian käsittämät perusoliot, eli luonnossa olevat rakenne-elementit. Esimerkiksi klassisessa mekaniikassa ja elektrodynamiikassa näitä olioita ovat kappaleet tai hiukkaset ja kentät, joilla on keskenään erilaiset luonteenpiirteiset ontologiset ominaisuudet [15].

Fysiikan tutkimus toimii aina luonnossa havaittavien tai teoreettisesti ennustettujen ilmiöiden ehdoilla. On mahdotonta käsitellä luonnon perusolioita irrotettuna ilmiöistä. Vasta ilmiöiden kautta luonnon perusoliot

tulevat fysikaalisesti mielekkäiksi. Tästä syystä ilmiöt muodostaa tärkeän osan fysiikan ontologisesta rakenteesta, sillä ne käsittävät olioiden dynamiikkaa koskevat lainalaisuudet ja ilmenemisen luonnossa. Teorian olioiden ja ilmiöiden ontologiset ominaisuudet eivät lukitse normatiivisesti luonnon perusrakennetta. Luonnon tulkinta tapahtuu sen suhteessa lukuisiin eri teorioihin, joilla voi olla keskenään hyvinkin erilaiset ontologiset rakenteet [16]. Tulkinnan rooli ei kuitenkaan ole sidottu luonnon tulkintaan teorioiden ehdoilla. Esimerkiksi hyvin formalistisesti orientoitunut fysiikan teoria voi tarvita ontologista tulkintaa, kuten kvanttifysiikan tapauksessa on.

Fysiikan teorioista voidaan erottaa niiden ontologisiin perusominaisuuksiin liittyvät komponentit, jotka voivat olla joko sanallistettuja teorian muotoilussa tai implisiittisiä, jolloin ne käyvät ilmi käsitteiden välisten suhteiden kautta. Fysiikan teorioiden sisällön ja luonteen syvälliseksi ymmärtämiseksi on keskeistä arvioida niiden sisältämiä ontologisia elementtejä (oliot, ilmiöt ja mekanismit) sekä millaisia episteemisiä seurauksia näillä teorioilla on tällaisen ontologisen rakenteen perusteella. Kvanttimekaniikan tapauksessa kvanttifysiikan ontologinen perusrakenne ja tulkinnat muuttuvat teorian muotoilusta riippuen. Toisaalta prosessi ei ole aina lineaarinen. Teorian ontologinen rakenne toisinaan puskuroi tulkintoja, mutta myös voidaan havaita tulkintojen ohjaavan teorian muotoilua tietyn ontologisen rakenteen tuottamiseksi [16].

Eräs tieteenfilosofian keskeisimmistä kysymyksistä on teorian ja todellisuuden suhde, tai toisin sanoen, millä tavalla teoria kuvaa sitä millainen todellisuus todella on ja voiko tällaista teorian ja todellisuuden välistä vastaavuutta ylipäättään olla. Teorian tasolla ontologinen viitekehys on välttämätön, mutta tämä ei tarkoita sitä että teorian käsittämä ontologia on missään määrin rinnastettavissa todellisuuteen. Jos rinnastus olisi mahdollista, täytyisi teorian esittämän käsitteellisen aineksen heijastella todellisia luonnon rakenneosia ja ilmiöitä. Tällöin voitaisiin puhua teorian käsitteiden olevan universaaleja ja mielen käsitteiden vastaavan niitä asioita joita ne edustavat. Toisaalta voidaan argumentoida ettei tällaisia universaaleja käsitekategorioita voida luotettavasti todentaa tai jos sellaisia on, ne ovat mielekkäitä ainoastaan teorian tasolla. Tällä kysymyksellä on keskeinen merkitys siinä, miten teorian virittämää ontologista rakennetta tulisi tulkita.

Tulkinnan asema tulee esiin kun teorian luomia uusia käsitteitä jäsennetään. Jokainen erityisen tulkinnan tulisi käsittää kaksi selityksen tasoa tasoa:

1.) miten teorian matemaattista formalismia tulisi ymmärtää käsitteellisesti
2.) miten teoria selittää empiiriset havainnot ontologisella tasolla.

Tulkintojen välillä voi tästä syystä olla poikkeava ymmärrys teorian ontologisesta rakenteesta sekä epistemologiasta, eli siitä mitä teorian puitteissa luonnosta ylipäätään voidaan tulkinnan mukaan tietää. Tulkinnan esittämä ontologinen tieto koskee teorian esittämää maailman rakennetta ja rakennusosia kun taas episteeminen tieto koskee sitä, millaisia ovat teorian asettamat tietämisen rajat luonnossa.

Tietylle ilmiölle voidaan antaa tulkinta, joka voi olla ontologinen, episteeminen tai molempia. Esimerkiksi indeterminismin voidaan käsittää johtuvan instrumentaalis-inhimillisistä rajoituksista, jolloin kyse on episteemisestä rajoitteesta, tai se voidaan tulkita puhtaasti ontologiseksi luonnon ominaisuudeksi. Ensimmäisessä tapauksessa on vielä tilaa teorian ontologisen rakenteen tulkinnalle, ja näennäisen ontologinen ominaisuus attribuoidaan episteemiseksi. Näin teorian tulkinnalla voi siis olla teorian ontologiseen rakenteeseen nähden “vapauttava” vaikutus.

Fysiikassa ollaan perinteisesti oltu taipuvaisia ymmärtämään havainnot tiedon ja käsitteiden lähtökohtana [17][18]. Luonnosta kerättävä havaintoaines jäsentyy, kun luonnossa havaittaville olioille ja ilmiöt käsitteellistetään. Tällaisia havaintoainesta korostavia fysiikan tutkimuksen lähestymistapoja kutsutaan *empiristisiksi* [17]. Empirismin juuret ovat aistihavaintoja korostavassa *klassisessa empirismissä* [18], jossa *a posteriori* (suom. aistihavaintojen jälkeen) tiedon olevan ainoaa tietoa, jota ihmisellä voi olla. Nykyisessä tieteenfilosofisessa keskustelussa keskeisempi kysymys on kuitenkin kuinka teorian todellisuusvastaavuus todentuu teorian mallien ja empiiristen havaintotermien vastaavuuden kautta.

Uudemmissa, klassista empirismiä laajentavissa näkökulmissa, kuten teorioiden loogisia rakenteita korostavan *loogisen empirismin* [19] ja *konstruktiiivisen empirismin* [20] tapauksessa empirismin piiriin on saatettu myös suorista aistihavainnoista irrotettuja *a priori* (suom. ennen havaintoa) käsitteellistämisen työkaluja ja malleja. Loogisessa empirismi, joka tunnetaan myös myös *loogisena positivismina* tai *tieteen standardikäsitteeksi*, on tieteenfilosofinen tietoteoria, joka laajalti kehysti tieteenkäsitteistä 1900-luvun alusta 1900-luvun puoleenväliin. Loogisen empirismin keskiössä vallitsee dikotomia kognitiivisesti mielekkäistä ja mielettömistä väitteistä, joiden erottaminen toisistaan on keskeistä. Väitteiden mielekkyydelle voidaan asettaa loogisen empirismin mukaan formaalit kriteerit. Ehdottomat kriteerit mielekkäälle lauseelle olivat seuraavat: väite oli joko formaalis-loogisesti tai empiirisesti vahvistettavissa. Teoreettiset lait, eli formaaleista käsitteistä ja malleista koostuvat jäsentäjät, redusoiuivat empiirisiksi laeiksi ns. *korrespondenssi-* eli vastaavuussääntöjen avulla.

Juuri tässä näkökannassa korostuu siksi tieteellisten teorioiden olemassa oleva staattinen käsiterakenne ja teorian sisäisten käsitteiden väliset loogiset yhteydet. Käytännössä tämä piirre ilmeni tieteen tekemisen

viitekehyksessä matemaattisen ja loogisen formalismin painotuksella. Karkeasti teorioiden nähtiin rakentuvan kolmesta komponentista [21]:

1. Abstrakti matemaattinen formalismi, joka on teorian selitysjärjestelmän looginen tukiranka ja joka implisiittisesti ankkuroi teorian käsitteet
2. Korrespondenssisäännöt, jotka kertovat miten teorian käsitteellinen sisältö kytkeytyy havaintomaailmaan ja antaa teorian formaaleille käsitteille kytköksen empiirisen havaintoaineeseen
3. Tulkitseva tai mallintava elementti, joka palauttaa matemaattisen formalismin tunnettuihin tai visualisoitaviin malleihin

Loogisen empirismin heikkoudeksi monelta osoittautui osin sen staattinen rakenne. Lähestymistavan tapa käsitellä käsiterakenteita on toimiva, kun tietorakenne on jo olemassa, mutta se ei kerro kuinka käsiterakenne muodostuu tai muuttuu. Erityisesti on epäselvää, kuinka tällaisessa järjestelmässä 3. tason havaintoainesta tulkitseva tietorakenne syntyy.

Toistaiseksi loogisen empirismin aikakauden jälkeen tieteenfilosofiassa ei ole ollut samalla tavalla yhtenäistä tieteen jäsennystapaa. Nykyisistä tieteenkäsityksistä erilaisen kirjon konstruktivistiset tieteenkäsitykset kuten, *konstruktivistinen empirismi -ja realismi* ovat sovellettavuutensa puolesta varteenotettavimpia tieteenfilosofian suuntauksia. Loogisen empirismin hiipumisen myötä tieteellisen realismi sekä ontologisiin mallien käyttäminen tieteiden jäsennyksessä on saanut kasvavaa hyväksyntää antirealistisesti virittyneen empirismin rinnalla.

Tieteellisessä realismissa, jonka kenties tunnetuin alamuoto ns. konstruktivistinen realismi, käsittelee tieteen malleja käsitteellisen tiedon toiminnallisina rakenteina, joiden kautta teoriaa ylipäätään voidaan soveltaa luontoon. Vasta mallien avulla teoreettinen käsiterakenne kommunikoi luonnon kanssa, jolloin teorian todellisuusvastaavuus voidaan todeta. Tässä näkökannassa teorian oikeellisuus voidaan todentaa sen käsitteellisen aineksen mallien ja luonnonilmiöiden *similariteetista* [22]. Konstruktivistisen realismin viitekehyksessä käsiterakenne nähdään perustavanlaatuisena. Similariteetin periaatteen mukaan teoreettisen käsiterakenteen voidaan väittää vastaavan luonnon todellisia lainalaisuuksia. Näkökulman puutteena voidaan pitää sen kyvyttömyyttä selittää miten similariteetti voidaan ylipäätään todentaa, jos tämä prosessi tapahtuu semanttisen tietorakenteen inhimillisen, kielellisen ja empiirisen saatavuuden rajoitusten puitteissa. Tämä puute on erityisen selvä silloin kun tarkastellaan tietyn mallin pätevyysrajoja. Esimerkiksi valon aaltomalli vastaa erinomaisesti Youngin suuren intensiteetin kaksoisrakokokeesta

saatavaa empiiristä havaintoaineistoa, mutta pienen intensiteetin kaksoisrakokokeessa valon aaltomalli on sopimaton ja mieletön.

Konstruktivistinen empirismi ottaa kantaa tähän kysymykseen. Konstruktiivisen realismin tavoin se pitää teorian malleja teorian keskeisinä elementteinä. Vaikka näkökannan mukaan teorioiden mallien kautta rakentuu teorian empiirinen pätevyys, teorian ei kuitenkaan voida sanoa välttämättä vastaavaan luontoa totuudenmukaisesti. Konstruktiivisessa empirismissä vain havaittavaa todellisuutta kuvaavat empiiriset mallit ja käsitteen ovat todellisuuden kuvailun kannalta merkittäviä, ja ne muodostavat teorian ns. *empiirisen alarakenteen*. Teoreettinen käsitteellinen ylärakenne, joka ei edes ole välttämättä empiirisesti verifioitavissa, on vapaasti muotoiltavissa.

Empirististen ja realististen tulkintojen rinnalla voidaan pitää *instrumentalismia*, joka täysin sivuuttaa teorian metafyyssisen tulkinnan. Instrumentalismi paitsi kieltää mielettöminä puheen kaikista havaitsemattomista teorian piirteistä, myös spekulatiot teorian ontologisesta alarakenteesta tai epistemeemisistä rajoituksista. Instrumentalistisessa näkökulmassa teorian ainoa tehtävä on tuottaa ennusteita, ei niinkään ymmärtää maailmaa. Tieteenfilosofisena suuntauksena se on toki mielenkiintoinen, mutta fysiikan pyrkiessä juurikin ymmärtämään koko maailmankaikkeutta, instrumentalismi saattaisi olla fysiikan kategorisena tieteenfilosofisena pohjavireenä tarpeettoman rajoittava ja pessimistinen.

2000-luvulla fysiikan piirissä, erityisesti kvanttimekaniikan ja suhteellisuusteorian suhteen on käyty vilkasta keskustelua teorioiden välttämättömästä ontologisesta sisällöstä ja siitä, miten niitä tulee tulkita suhteessa todellisuuteen. Ei tule kuitenkaan unohtaa sitä, että luonnontieteiden viitekehyksessä on usein käyty kiivaita väittelyitä ontologisista rakenteista, kuten ns. atomismi-kontinuumi -väittelyt, joita käytiin varhaisista helleenististä ajoista aina atomistien ja energeetikoiden välisiin väittelyihin 1900-luvun alkuun asti. Historian perusteella on ilmeistä, että tieteellisen teorian kehittyessä teorian ontologinen rakenne on muutoksen alainen, aina puskuroiden uusia tulkintoja [23].

2.2. Kvanttifysiikan ontologinen rakenne

Kvanttifysiikalla, kuten muillakin fysiikan teorioilla on oma ontologinen rakenteensa. Jos tarkastellaan anakronistisesti laajalti hyväksyttyä kvanttifysiikan standardia muotoilua [24], teorian matemaattinen viitekehys ei tarjoa monia intuitiivisesti klassiseen fysiikkaan liitettäviä olio-ontologioita. Luonnollisesti kvanttifysiikan syntyvaiheilla teoria ei ollut näennäisesti eriytynyt klassisen fysiikan ontologisen rakenteen viitekehyksestä, vaan puhuttaessa varhaisesta kvanttifysiikasta olio-ontologiat jäsennettiin

klassisesti, vaikka ilmiöt olivatkin pohjimmiltaan epäklassisia [23]. Tulee kuitenkin muistaa, että kuten kvanttifysiikka myös klassinen fysiikka kävi läpi moninaisia ontologisen rakenteensa muutoksia, eikä sen ontologinen rakenne ollut sen varhaisvaiheilla 1600-luvulla sen jäsentyneempi kuin kvanttifysiikan 1900-luvun alussa, eikä sen tuomat muutokset fysiikan kokonaisuuden ontologiselle rakenteelle olleet sen intuitiivisempia kuin Newtonilainen mekaniikka tai aalto-oppi aristoteelisen luonnonfilosofian näkökulmasta.

Kuten fysiikan teorioiden luonnollisen kehityksen kannalta on johdonmukaista, erityisesti varhainen kvanttifysiikka on lainannut käsittelemiensä olio-ontologioiden ja ilmiöiden nimityksiä klassisesta fysiikasta, erityisesti Newtonin mekaniikasta ja klassisesta aalto-opista. Tämä on luonnollista, sillä uusia ilmiöitä on täytynyt jäsentää ja/tai suhteuttaa olemassaolevien käsitestruktuurien ehdoilla. Klassisesta fysiikasta tunnettujen olio-ontologioiden nimityksiä edelleen aalto ja hiukkanen käytetään kvanttifysiikan kontekstissa joustavasti riippuen kuvailtavasta ilmiöstä. Näitä termejä ei kvanttifysiikan tapauksessa käytetä niiden ontologisessa merkityksessä, vaan niillä viitataan ainoastaan malleihin jotka ovat samannimisiä. Kvanttifysiikan lähimpänä vastineena klassisen fysiikan olio-ontologioille hiukkanen ja aalto voidaan pitää ns. kvanttimekaanista ”*tila*” -käsitettä. Siinä missä klassisen fysiikan ontologinen rakenne sisältää kaksi perusoliota, hiukkaset ja aallot, kvanttifysiikan ontologinen rakenne edellyttää ainoastaan yhtä perusoliota, joka on ominaisuuksiltaan unitaarinen [25]. Formaalisti peruskvanttoliota tai ”tilaa” käsitellään yleistetyn Hilbertin vektoriavaruuden tilavektorina, mutta se miten kvanttiolio-ontologian luonnetta tulkitaan fysikaalisesti ei ole tähän puhtaasti matemaattiseen identiteettiin nojautuen suinkaan yksiselitteinen.

Kvanttoliio-ontologioiden ontologisten ominaisuuksien tarkastelussa tulee kiinnittää huomiota ainakin seuraaviin keskeisiin ontologisten perusominaisuuksien kategorioihin[15]:

1. Determinismi
2. Olemassaolo
3. Paikallistuvuus
4. Spatiaalinen luonne
5. Radallisuus
6. Yksilöityvyys

Determinismi viittaa ennen kaikkea vuorovaikutuslakien luonteeseen. Fysiikan viitekehyksessä merkittäviä determinismin tyyppejä tunnetaan tieteenfilosofiassa ainakin kaksi: *kausaalinen* - ja *asianmukainen* (eng. adequate) determinismi. Kausaalisen determinismin mukaan jokainen tapahtuma on

välttämätöntä seurausta sitä edeltäneistä tapahtumista, jotka ovat kytkeytyneet yhteen yksikäsitteisillä luonnonlaeilla [26]. Kvanttifysiikan piirissä tällaisen determinismin muotoa ei tavallisesti hyväksytä vaikka klassisen fysiikan piirissä luonnonlakien ontologinen luonne tulkitaan kausaalisen deterministiseksi.

Tietyissä kvanttifysiikan tulkinnoissa täysin kausaalis-determinististen lakien näennäistä puuttumista selitetään ns. *piilomuuttuja* -teorioilla, joissa kausaalinen determinismi palautuu konjektuurisesti kun toistaiseksi tuntemattomat kvanttifysiikan muuttujat otetaan huomioon. Myös kvanttimekaniikan eräässä ns. *Bohmilaisessa mekaniikassa* tulkitaan luonnonlait kausaalisen deterministiseksi, vaikka tulkinnan mukaan tämä kausaalisuuden taso käy ilmi ja voidaan empiirisesti todentaa ainoastaan tapauksissa joissa koko universumin reunaehdot tunnetaan tarkasti. Tämän tulkinnan voidaan nähdä liittyvän läheisesti ns. *Laplacen koneen* ajatukseen. Mielenkiintoista on kuitenkin että ankarimman kausaalisen determinismin vaatimus näyttäisi välttämättömän sitovalta edes klassisen fysiikan piirissä. Esimerkiksi klassisen mekaniikan piirissä tunnetaan teorian tasolla tiettyjä matemaattia systeemeitä, joiden kehitys ei ole kausaalisen deterministinen [27].

Kevyempi asianmukainen determinismi pitää niin ikään kiinni makroskooppisesti deterministisistä luonnolaista, mutta sallii yksittäisten tapahtumien indeterminismin sillä edellytyksellä, että suurilla alkeistapahtumien lukumäärillä luonnonlait tuottavat makroskooppisesti deterministisiä ennusteita [28]. Tämä lievennetyn determinismin muoto on yleisimmin hyväksytyissä kvanttifysiikan tulkinnoissa, ja useissa tulkinnoissa kvanttifysiikan lakien ontologisen luonteen tulkitaan olevan asianmukaisen deterministinen. Tämä tarkoittaa kääntäen myös sitä, että kvanttifysiikan ilmiöihin liittyy mahdollisesti perustavanlaatuisen indeterminismin. Kvanttifysiikan standarditulkinnassa käsitetään kvanttiolio-ontologian täydellisen kuvailun mahdottomuuden olevan *välttämätön* kvanttifysiikan ontologinen piirre.

Olemassaololla viitataan erityiseen fysiikan olio-ontologioiden olemisen pysyvyyteen ja olemisen luonteeseen. 1900-luvulle saakka Aristotelisen luonnonfilosofian myötävaikutuksesta atomeja ei pidetty yleisesti todellisuuden yksinkertaisimpina rakenneosina. Aristotelisen luonnonfilosofian valossa Newtonilaisen "atomin" ei pitäisi olla fysikaalisesti mahdollinen, vaan korkeintaan matemaattis-käytännöllinen malli, jonka avulla voidaan hahmottaa tiettyjä luonnonilmiöitä. Sittenkin, erityisesti kineettisen kaasuteorian myötävaikutuksesta, atomistinen näkökanta sai hyväksyntää ja mikroskooppisten objektien atomaarinen tulkinta muodostui standardiksi. Tämän myötä Newtoninlaisen hiukkasen fysikaalinen luonnon ontologisen todellisuuden hyväksyminen vahvistui. Nykyisin atomistinen maailmankuva on siinä määrin yleisesti hyväksytty, ettei hiukkasen todellisuudesta liene epäilystäkään.

Kenttien fysikaalisen todellisuusluonteesta vakuuttuminen ei ole aivan yhtä itsestäänselvää kuin hiukkasten tapauksessa. Aallot ja kentät vaikuttamat ennemminkin matemaattis-käytännöllisinä malleina sen sijaan että ne nähtäisiin itsenäisinä ontologisina perusolioina. Kenttäolioiden todellisuuden osoittaminen ei kuitenkaan vaadi klassisen fysiikan käsittävien ajatusten lisäksi sen edistyneempiä malleja, vaan seuraavanlainen yksinkertainen ajatuskoe on riittävä [29]:

“Alice heiluttaa kädessään olevaa kiinteää varausta edestakaisin kohtisuoraan kuuta vastaan. Bob taas, joka asustelee kuun maata vastaan kohtisuorassa olevalla pinnalla, pitää kädessään toista varausta täysin paikallaan. Noin 1 s sen jälkeen kun Alice on heilauttanut kädessään olevaa varausta, Bobin varaus värähtää. Bobin varauksella täytyy siis olla nyt liike-energiaa. Energian on täytynyt tietysti tulla Alice heilauttaman varauksen synnyttämästä sähkömagneettisesta aallosta. Kysymys kuuluu, missä energia on ollut sen yhden sekunnin ajan, kun kumpikaan varaus ei vielä tai enää ollut värähdysliikkeessä? Energian on täytynyt olla Maan ja Kuun välisessä tyhjässä (aineettomassa) avaruudessa. Energian on täytynyt siis olla kentässä.”¹

Tästä voidaan päätellä että klassiset hiukkaset ja kentät ovat molemmat yhtä fysikaalisesti todellisia olioita. Kumpikaan ei ole alisteinen toiselle tai sen perustavanlaatuisempi kuin toinen, vaan ne molemmat liittyvät klassisen fysiikan keskenään erilaisten ilmiöiden ja ongelmien käsittelyyn - toisinaan käsiteltävä ilmiö on kenttäilmiö, toisinaan hiukkasilmiö.

Miten olemassaolon ominaisuus pitäisi käsittää kvanttiolio-ontologian näkökulmasta? Luonnollisesti kvanttifysiikan piirissä ei suinkaan ajatella että kvanttiolio-ontologioiden olemassaolo olisi jossain määrin kiistanalainen, vaan että olioiden olemisen tapa on poikkeuksellinen verrattuna klassisiin olio-ontologioihin. Kysymys on siitä, onko olio-ontologia olemassa ainoastaan sen vuorovaikuttaessa vai onko olio-ontologialla vuorovaikutustilanteiden ulkopuolella merkityksellinen hyvin määritelty tila. Olemassaolon ominaisuuteen liittyy myös kiinteästi kysymys olion liittyvistä fysikaalisista ominaisuuksista. Ovatko olioon liittyvät fysikaaliset mitattavat suureet ymmärrettävä olio-ontologiaan erottamattomasti liittyvinä hyvin määriteltyinä ominaisuuksina, vai esimerkiksi eräänlaisina olion myötä koheroivina epifenomeneina, joilla ei ole fysikaalista merkitystä irrotettuna asianmukaisesta mittauksesta. Tuore tutkimustieto antaa esimerkiksi ymmärtää että saman kvanttiolion kaksi mitattavaa ominaisuutta saattavat olla spatiaalisesti eriytyneitä [30]. Toisaalta näiden tulosten tulkinnasta ei olla yksimielisiä

¹ Vapaa käännös

nykytutkimuksen valossa [31]. Kysymys kvanttiolio-ontologioiden olemassaolon luonteesta on siis avoin. Modernissa kvanttikenttäteoriassa ns. luomis- ja tuhoamisoperaatioilla on oma keskeinen merkityksensä paitsi matemaattisena konstruktiona, myös tapana ymmärtää kvanttiolio-ontologioiden olemassaolon luonnetta. Kvanttiolio-ontologioiden ei siis nähdä olevan antiikin luonnonfilosofian ja toisaalta klassisen fysiikan ontologian mukaisesti katoamattomia, vaan ne tulevat “luoduiksi” ja tuhotuiksi asianmukaisissa vuorovaikutustilanteissa.

Paikallistuvuus viittaa olioiden ja ilmiöiden paikan määrittämisyyteen tiettyinä ajanhetkinä. Paikallistuvuus ja olion *spatiaalinen luonne* liittyvät toisiinsa siinä määrin, että olion pistemäisyys, muu erityinen spatiaalinen rajoittuneisuus tai levinneisyys joka liittyy olioon itseensä tekee paikallistuvuuden määrittämisen epätriviaaliksi. Spatiaalisesti levinneen olion paikallistuvuus ei ole itsestäänselvä, kuten ei ole mielekästä sanoa aalto-opin perusolion eli aallon olevan paikallistettavissa.

Klassisten hiukkasten paikat ovat aina hyvin määriteltäviä. Sillä on aina yksikäsitteinen ja ainutlaatuinen paikkakoordinaatti, joten hiukkaset ovat aina määriteltäviä sijaitsemaan *tietyissä* avaruuden pisteessä. Klassiset aallot ovat erilaisia tässä suhteessa. Kenttä on laaja, periaatteessa koko avaruuden yli levittänyt olio. Aallon ei voi siis sanoa sijaitsevan jossakin tiettyssä kentän pisteessä, vaan se on aina koko jokaisen kentän avaruudellisen pisteen käsittämä. Kenttä on siis, toisin kuin hiukkanen, epälokaali, koko avaruuden yli levittänyt olio. Klassisen hiukkasen kenties tunnetuin ominaisuus on niihin liittyvien vuorovaikutus- tapahtumien diskreettisyys. Hiukkaset voidaan yksilöidä, laskea niiden lukumäärä yksitellen. Myös niiden vuorovaikutus on diskreetti niin muiden hiukkasten kuin kenttien kanssa. Kentillä ei ole vastaavaa ominaisuutta. Kentän aallot ovat levittäytyneitä ja toisistaan erottamattomia. Yksittäisen klassisen kentän aallon Fourier-komponenttien määrä on periaatteessa ääretön vaikka aalto olisikin hyvin yksinkertainen. Aaltoja ei voi yksilöidä, laskea, eikä niiden vuorovaikutus rajoitu yksittäiseen pisteeseen, vaan käy yli koko kentän käsittämään avaruuden.

Hiukkas-aaltodikotomia, joka on erityisen voimakkaasti korostunut esikvanttifysiikan ja aaltomekaniikan viitekehyksissä, tekee ontologisesta olion paikallistuvuudesta puhumisen tarpeettoman moniselitteiseksi. Modernissa kvanttifysiikassa aaltohiukkas-dualismismi on lähinnä artefakti, joka syntyy taipumuksesta käsitteellistää kvanttifysiikka klassisin mallein. Kuten modernin kvanttifysiikan standardimuotoilussa artikuloidaan, teoriassa on vain yksi olio-ontologia joka on aidosti unitaarinen. Tällä oliolla voi olla näille kahdelle klassiselle olio-ontologialle tyypillisiä ominaisuuksia tietyissä vuorovaikutustilanteissa, mutta ontologisesti olioita on kvanttifysiikan teoriassa vain yksi.

Rata on erityinen paikallistettavan ja *yksilöitävän* olio-ontologian ominaisuus, jolla on voimakkaat juuret klassisen mekaniikan hiukkasiin ja kinematiikkaan. Radalla viitataan reittiä, eli niiden spatiaalisen avaruuden pisteiden joukkoa joille ratafunktio, eli olion paikka ajan funktiona, on ajan suhteen surjektiivinen kuvaus. Olion yksilöityvyys taas kaikkein voimakkaimmassa merkityksessään viittaa olion erityiseen ominaisuuteen, joka tekee siitä erotettavan muista näennäisen identtisistä oliosta. Ominaisuuteen voidaan nähdä viittaavan myös olioiden numeroitavuudesta tai toisaalta olioiden lukumäärän säilymiseen vuorovaikutustilanteissa.

Klassisen hiukkasen ontologiaan kuuluu se, että hiukkasen voidaan aina mallintaa kulkevan sellaista rataa pitkin, joka piirtää hiukkasen oman uniikin *maailmanviivan* [15]. Tämän lisäksi, kun kaksi hiukkasta kohtaavat tietyssä avaruuden pisteessä ja törmäävät, ne kimpoavat siten, että kaksi hiukkasta ei koskaan sijaitse samassa aika-avaruuden pisteessä. Tästä seuraa se, etteivät kaksi eri hiukkasten maailmanviivaa voi koskaan leikata toisiaan. Tällöin maailmanviivaa seuraamalla voidaan jäljittää mielivaltaisen hiukkasen paikkaa ajan suhteen katkeamatta siten, että se voidaan aina erottaa muiden hiukkasten maailmanviivoista. Hiukkanen on siis maailmanviivansa uniikkiuden ja hiukkasontologialle tyypillisen lokaalin vuorovaikutusluonteen mukaan *yksilöityvä*. Maailmanviivojen tunnistamisen myötä jokainen hiukkanen on aina yksilöitävissä muista hiukkasista, sillä jokainen hiukkanen piirtää aina oman maailmanviivansa, eivätkä viivat voi muuttua toisikseen tai haarautua.

Aalloilla ei ole vastaavia rajoituksia. Aallon todettiin olevan avaruudellisesti levinnyt olio, eikä sen voida mielekkäästi sanoa sijaitsevan erityisesti missään tietyssä avaruuden pisteessä. Vaikka aaltoilmiöt etenevät äärellisellä nopeudella, ei ole mielekäästi sanoa, että esimerkiksi ulommaisin aaltorintama edustaa aalto-oliota jollakin erityisellä tavalla. Mielivaltainen aalto taas voidaan rakentaa mielivaltaisesta monokromaattisten aaltojen lineaariyhdestelmästä. Tämä purkaminen/kokoaminen voidaan taas tehdä äärettömän monella erilaisella tavalla, jolloin ei ole oikeastaan mielekäästi edes sanoa, että aalto on juuri tietyn esityksen mukainen, koska mielivaltainen lineaarikombinaatio niin ikään alkeisaalloista tuottaa yhdenvertaisen kuvauksen oliosta. Tällöin voidaan myös turvallisesti sanoa, että kaksi tai useampi kentän aalto voi sijaita yhdenaikaisesti samassa avaruuden pisteessä. Aalto-olioiden lineaarisen superpositioperiaatteen vuorovaikutusluonteen mukaisesti aaltojen vuorovaikutuksessa syntyy resultanttiaalto kentän jokaiseen pisteeseen. Tämän avaruudellisen levinneisyyden ja aaltoalkioiden monikäsitteisyyden mukaan kenttäolioiden ei voida sanoa olevan yksilöityvä samassa mielessä kuin hiukkanen, vaan kenttä ilmenee avaruudellisesti levinneiden aaltojen superpositiotiloina, jotka eivät ole yksikäsitteisiä.

Kvanttifysiikan standardissa muotoilussa Levy-Leblondin esittämän maailmanviivan piirtäminen on yleisesti mahdotonta. Kvanttiolio-ontologioilla ei ole hyvin määriteltyä paikkaa, eikä niiden spatiaalinen luonne ole diskreetti. Lisäksi kvanttimekaniikan mukaan luonnon perusolioilla on keskenään identtiset fysikaaliset (mitattavat) ominaisuudet. Tällöin jos kaksi ominaisuuksiltaan identtistä oliota vuorovaikuttavat kvanttimekaniikan vuorovaikutuslakien mukaisesti keskenään esimerkiksi olioden keskinäisessä siroamisessa, on suorastaan periaatteen tasolla mahdotonta erottaa oliota toisistaan. Kvanttikentäteoreettisissa tarkasteluissa oliot suorastaan “tuhotaan” ja “luodaan” vuorovaikutustilanteissa, mutta toisaalta ei ole selvää missä suhteessa tämä toiminto on luonteeltaan ontologinen tai ainoastaan mallinnallinen. Jokatapauksessa kvanttiolio-ontologialta puuttuu kahdessa suhteessa klassiset rataominaisuudelle välttämättömän ontologiset ominaisuudet, paikallistuvuus sekä yksilöityvyys.

On tärkeää huomata että kvanttifysiikan teorioiden olio-ontologioita ei ole välttämätöntä tulkita alisteisena klassisen fysiikan olio-ontologioille, vaan ne on tulkittava näistä erillisinä. Kvanttifysiikan historiasta voidaan nähdä kvanttifysiikan kvanttiolio-ontologian muotoutuvan ensin klassisen fysiikan olio-ontologioiden nimillä ennen de Broglien dualismi -hypoteesia, klassisten olio-ontologioiden yleistyksenä ja lopulta abstrakteina Hilbert avaruuden tiloina joilla ei ole enää mitään ilmiselvää kytköstä klassisiin olio-ontologioihin[32].

2.3. Kvanttifysiikan tulkinnan vaikutus ontologisiin rakenteisiin

Kvanttifysiikka on fysiikan teoria joka on muotoutunut yli sata vuotta, eikä sinä aikana sen ontologisesta rakenteesta ole missään vaiheessa ollut yksimielisyyttä. Erityisesti 1900 -luvun alussa ei voitu puhua minkään tason yksimielisyydestä sen suhteen, miten kvanttimekaaniset ilmiöt kuten sähkömagneettisen säteilyn kvantittunut vuorovaikutusluonne tulisi jäsentää ontologisesti [32]. Vaikka Planckin laki hyväksyttiin aikanaan tiedeyhteisössä, se miten lain ilmentämä todellisuuskuva tulisi ymmärtää oli avoin kysymys. Planck itse tulkitsi aluksi oman lakinsa kvanttiaskleen lähinnä matemaattiseksi tempuksi, eikä tulkinnut sen ilmentävän mitään ristiriitaa silloisen fysiikan kokonaiskuvan ontologiselle rakenteelle. Vasta Einstein otti ensimmäisenä vakavasti ns. kvanttihypoteesin, jolloin kvanttifysiikan erilaisten tulkintojen ilmentämät ominaiset ontologiset rakenteet alkoivat pikkuhiljaa ottamaan muotoaan [32].

Sytä sille miksi kvanttifysiikan tulkinta vaikuttaa klassiseen fysiikkaan verrattuna haastavammalta voidaan nimetä useita. Eräs suosituimmista perusteluista kvanttifysiikan tulkinnan vaikeudelle on sen vaikea matemaattinen ulkoasu [33]. Argumentti ei kuitenkaan kestä lähempää tarkastelua, sillä jokaisella

fysiikan erikoisalueella (elektrodynamiikassa, statistisessa mekaniikassa, termodynamiikassa, hydrodynamiikassa etc.) törmätään yhtäläisellä tavalla haastaviin matemaattisiin rakenteisiin. Toisaalta kvanttifysiikan ja erityisesti kvanttikenttäteorioiden matemaattinen luonne on omaleimaisen abstrakti, sillä se perustuu laajalti Hilbertin avaruuden abstraktien tilojen matemaattiselle manipulaatiolle, joka on kvanttifysiikalle ehdottomasti omaleimaista.

Kvanttifysiikan erilaisille tulkinnoille on jossain määrin myös tavallista esitellä tyystin uutta matemaattista formalismia pyrkiessään ratkaisemaan kvanttifysiikan tulkinnallisia ongelmia, joista kuuluisimpana voidaan mainita Bohmilainen mekaniikka, jolla on empiirinen vastaavuus kolmen kvanttimekaniikan standardiformalismien - Schrödingerin aaltomekaniikan, Heisenbergin matriisimekaniikan sekä Feynmanin polku- integraaliformalismien kanssa. Erityisen mielenkiintoista on myös erilaisten kvanttimekaniikan formalismien välttämätön ekvivalenssi, joka korostaa erilaisten luonnon kuvaustapojen yhteismitallisuutta, joka haastaa kriittisesti käsityksen siitä että kvanttifysiikkaa voitaisiin ymmärtää ainoastaan tietystä uniikista formalismista ja sen virittämästä ontologisesta rakenteesta [34].

Formalismien abstraktiudesta huolimatta kvanttifysiikan tulkinnan tulisi antaa suhteellisen vahvoja kantoja teorian ontologisesta rakenteesta ja siitä mitä voidaan ylipäätään luonnosta tietää. Kvanttifysiikkaan vaikuttaa kuuluvan varsin kiinteästi tietynasteinen indeterminismi, joka asettaa suhteellisen raskaita tulkinnallisia haasteita, joihin ei ole selkeitä vastauksia. Kvanttifysiikka käsittelee haasteellisesti muitakin ontologisia perusominaisuuksia, kuten lokaalisuutta ja realismia. Lisäksi kvanttifysiikkaan liittyy kuuluisa kvanttifysiikan *mittausongelma*, eli havaitsijan vaikutus mitattavaan systeemiin. Kvanttifysiikan tulkintojen välillä on paljon vaihtelevuutta siinä miten nämä ontologiset ominaisuudet ja ongelmakohdat ymmärretään luonnon tasolla.

Kvanttifysiikan tapauksessa erityisen keskeinen merkitys ontologisen rakenteen määrittelyssä on teorian tulkinnalla. Tämä käy selväksi kun vertaillaan keskenään erilaisia kvanttifysiikan tulkintoja. Erilaisia tulkintoja on niin paljon, ettei tässä työssä ole tarkoituksenmukaista mennä yksityiskohtiin jokaisen tulkinnan uniikeissa painotuksissa. Seuraavassa taulukossa on nähtävissä suurpiirteisesti joidenkin paremmin tunnettujen kvanttifysiikan tulkintojen ontologiset painotukset:

Tulkinta	Determinismi	Realismi	Piilo-muuttujia	Subjektin vaikutus	Lokaa-lius	Olemassa-olo	Uniikki historia
Ensemble	Ehkä	Ei	Ehkä	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Kööpen-haminalainen	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä
Bohmilainen	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Moni-maailma	Kyllä	Ehkä/Ei*	Ei	Ei	Kyllä	Ehkä/Ei*	Ei
Subjektiivinen romahdus	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä
Relationaalinen	Ehkä	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä
Yhtenäiset historiat	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä
Statistinen	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Objektiivinen romahdus	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä

Taulukko 1: Kvanttifysiikan tulkintojen ontologiset painotukset

On syytä tähdentää, ettei yksikään tulkinnoista poikkea kokeellisesti toisistaan. Kaikki tulkinnat ovat ns. yhteensopivia mittaustuloksien kanssa ja sisäisesti koherentteja. Näennäiset ristiriidat ilmenevät ainoastaan teoriassa ja metafysiikan tasolla. Mahdollisten tulkintojen rajaaminen vaatisi uusia kokeita jotka koettelevat y.m. ontologisia ominaisuuksia tai niiden mahdollisia keskinäisiä kytköksiä.

Tulkintojen ollessa moninaisia ja keskenään hyvinkin ristiriitaisia, ei ole kovin yllättävää, että kvanttifysiikan harjoittajien piirissä on juurtunut voimakkaasti instrumentalistinen lähestymistapa kvanttifysiikkaan. Tällainen lähestymistapa on ollut vahvasti edustettuna jo kvanttifysiikan varhaisista vaiheista. Esimerkiksi P. A. M. Dirac ja myöhemmin R. Feynmann osoittivat hyvin vähäistä kiinnostusta kvanttifysiikan tulkinnalle ja kvanttifysiikan implikoimiin ontologis-episteemisiin seurauksiin [35]. Kvanttifysiikan teorian kehitys ja sen soveltaminen luontoon ei vaikuta olevan alisteinen yksittäiselle metafysiisen tulkinnan noudattamiselle. Fysiikan tehtäväksi katsotaan ennemminkin kyky tuottaa

ennusteita. Realismin suhteen instrumentalisti voi olla agnostinen, pohjimmiltaan tällä ontologisella piirteellä ei kuitenkaan ole vaikutusta itse kvanttifysiikkaan teorian.

3. Kvanttifysiikka opetuksen ja oppimisen haasteena

3.1. Fysiikan opetuksen tutkimuksen taustaa

Tieteellinen tieto, kieli ja käsitteet ovat yleisesti luonteeltaan abstraktimpia kuin näiden arkiperäiset vastineet. Tieteellisen tiedon käsitteet muodostavat monimutkaisia merkitysverkostoja joissa itse käsitteillä kuin välisillä suhtautumisilla toisiinsa on keskeinen merkitys. Arkiperäisen käsitteellisen tieto koostuu vastaavasti tyypillisesti konkreettisista ja visualisoitavista käsitteistä [36]. Käsiteverkostot voivat käsittää hyvin laajoja ilmiöjoukkoja, mutta ne eivät ole ideaalisten tieteellisten käsiteverkostojen tavoin jäsentyneitä, sisäisesti koherentteja ja ne saattavat koskea vain hyvin erityisiä tai suorastaan yksittäisiä ilmentymiä.

Tavalla tai toisella jokaisen ihmisen oppimisen lähtökohdat ovat sidoksissa näihin arkiperäisiin käsiterakenteisiin, jotka rakentuvat täysin orgaanisesti ihmisen pyrkiessä jäsentämään ja ymmärtämään omaa elinympäristöään. Opiskelijoiden käsitteisiin liittämät arkiperäiset ennakkokäsitykset -ja mallit nähdään tieteellisen tiedon oppimista haittaavana tekijänä. Onkin keskeistä ymmärtää tieteellisten ja arkisten käsitteiden eroja ja niiden keskinäistä suhdetta jotta voidaan ymmärtää miten käsitteellinen muutos tapahtuu ja miten tieteellisten mallien oppimista voidaan edistää tuntien opiskelijoiden lähtökohdat.

Mallintamisella on tunnetusti fysiikassa keskeinen merkitys. Riippumatta tarkasteltavasta lähestymistavasta erilaiset semanttiset-, symboliset ja mentaalimallit muodostavat suuren osan fysiikan tietorakenteiden rakenneosista ja niiden välisistä selittävästä suhteista. Mallit ovat sellaisia teorioiden osia, jotka viittaavat teorian sisäisen rakenteen ulkopuolelle, joko havaittavaan maailmaan tai muihin samoja ilmiöitä tai malleja tutkiviin teorioihin. Tätä kautta mallien merkitys on fysiikan teorioiden lakiennusteiden tekemisessä, mutta toisaalta fysiikan teorioiden jäsennyksessä sekä tulkinnassa[37][38]. Samalla fysiikan malleilla on asemansa fysiikan teorioiden työkaluina, joilla semanttinen tietorakenne käsitellään.

Fysiikan opetuksen tutkimuksen, eli PER:n (Physics Education Research) tarkoituksena on selvittää miten opiskelijat ja ihmiset yleensä oppivat fysiikkaa, ymmärtää fysiikan oppimisen liittyviä haasteita sekä

tutkia fysiikan oppimiseen liittyviä asenteita. Näitä tietoja hyödyntämällä voidaan ymmärtää oppilaiden käsitystä fysiikasta sekä tuottaa opetuksellisia ratkaisuja, joiden avulla fysiikan opetusta voidaan tehostaa. PER tutkimus on onnistunut osoittamaan, että fysiikan opetus on hyvin samanlaista kaikkialla maailmassa niin tavoitteiden, menetelmien kuin arvioinnin osalta. Lisäksi on ilmeistä, että opiskelijoiden väärinkäsitykset ja oppimisen vaikeudet ovat luonteeltaan pohjimmiltaan samoja riippumatta missä opiskelu tapahtuu [39]. PER tutkimus on onnistunut näiltä osin käynnistämään laajan opetusmenetelmien kyseenalaistamisen ja uudelleenarvioinnin.

Keskeisenä PER tutkimuksen tuloksena voidaan pitää havaintoa ns. perinteisiin passiivisiin luentoihin, kaavamaisiin laboratorioihin ja monoliittisiin lopputentteihin keskittyvien fysiikan kurssien tehottomuudesta saada aikaan tarkoituksenmukaista käsitteellistä muutosta edes ongelmanratkaisussa hyvin pärjänneiden opiskelijoiden osalta [11]. Opiskelijoita osallistavat, ilmiöitä arkielämään yhdistävät ja opiskelijoiden oppimista huomioonottavat opetuskokeilut ovat vaikuttaneet huomattavan paljon tehokkaammilta. Toisaalta tällaiset opetusmenetelmät usein voivat rajoittaa käsiteltävää aihekokonaisuutta, ovat vaikeita toteuttaa suurissa ryhmissä, eikä valtaosa opiskelijoista pidä tällaisia oppimismenetelmiä itse mielekkäinä [3]. Silti tutkimukset osoittavat, että opiskelijat saavuttavat paremman käsitteellisen ymmärryksen aiheesta verrattuna perinteiseen luento-opetukseen [11].

Opiskelijoiden omien käsiterakenteiden ja oppimisesprosessin ymmärtämisellä on keskeinen merkitys PER tutkimuksessa. Tutkimusta opiskelijoiden muodostamista käsityksistä on tehty laajasti niin mekaniikan, sähkömagnetismin, lämpöopin kuin modernin fysiikan alueelta. Lisäksi PER:n piirissä on tehty myös paljon yleistä fysiikan viitekehyksestä irrotettua tutkimusta liittyen niin asiantuntijuuteen, ongelmanratkaisu- taitoihin kuin opiskeluun liittyviin asenteisiin.

3.2. Kvanttifysiikan opetuksen tutkimus

Kvanttifysiikka on keskeinen fysiikan teoria. Sen merkitystä teoriana ei voida korostaa tarpeeksi niin fysiikan perustutkimuksen kuin sen lukuisten sovellusalueiden kuten kemian, lääketieteen sekä tekniikan tanakkana teoreettisena selkärankana ja työkalupakkina. Silti kvanttifysiikka käyttää käsitteitä jotka vaikuttavat vierailta verrattuna klassisiin ja (psykologisesti) luonnollisiin luontoa koskeviin käsityksiin. Kvanttifysiikan käsitteet vaikuttavat ulkonaisesti abstrakteilta ja luonteeltaan vaikeasti erilaisiin konkreettisiin ja visualisoitaviin käsitteisiin rinnastettavilta. Muillakin fysiikan osa-alueissa, arkikäsitykset ja erilaiset naiivit esimallit ovat siitä huolimatta välttämättömiä opiskelijoiden lähtökohtia tiellä kohti abstraktien tieteellisten käsiterakenteiden muodostusta [6][40].

Verrattuna moniin muihin fysiikan osa-alueisiin, kvanttifysiikan opetuksen ja käsiterakenteiden tutkimusta on tehty PER tutkimuksen piirissä vain hyvin vähän. Lisäksi ainuttakaan suurta, esimerkiksi yli 500 opiskelijan aineistolle suoritettua tutkimusta kvanttifysiikan opetuksen ja käsiterakenteiden piirissä tehty tutkimus ei ole toistaiseksi tehty [3]. Ottaen huomioon kvanttifysiikan merkittävyyden fysiikan kokonaiskuvan kannalta onkin tätä erityisaihetta syytä tutkia enemmänkin ei ainoastaan kvalitatiivisella tasolla ja ad hoc opetusehdotusten tasolla, myös kvantitatiivisella tasolla ja koetella kvanttifysiikan opetukseen liittyvien ongelmien väitteet ankarana metodisesti.

3.2.1. Kvanttifysiikan opetuksen sisällöllisiä haasteita

Eräs fysiikan opetuksen tutkimuksen mielenkiintoisista löydöksistä on opiskelijoiden taipumus muodostaa puutteellista tai suorastaan kelvotonta käsitteellistä kuvaa fysiikasta. Tämä yhdistää niin hyvin kuin huonosti kirjallisissa ongelmanratkaisutehtävissä pärjääviä opiskelijoita. Syystä tai toisesta erityisesti fysiikassa on opiskelijoiden vaikeaa käyttää fysiikan käsitteitä johdonmukaisesti ja suhteuttaa niitä yleisesti hyväksyttäviin fysiikan teorioihin ja malleihin [3]. Tämä mielenkiintoinen fysiikan tietojen ja taitojen dikotomian eli ongelmanratkaisun ja käsitteellisen ymmärryksen eriytyvyys on erityisen hyvin korostunut kvanttifysiikassa, jonka opetuksessa monet opettajat korostavat laskemista kvanttifysiikan työkalupakin haltuunottamiseksi. Näin kysymykset kvanttifysiikan käsitteellisestä rakenteesta, ontologiasta sekä teorian episteemisistä piirteistä sivuutetuiksi [6].

Monet tutkimustulokset ovat näyttäneet, että opiskelijoiden käsitykset kvanttifysiikan olio-ontologioista ja ontologisesta rakenteesta ovat alisteisia klassisille hiukkas- ja aaltokuvauksille ja klassisen fysiikan ontologiselle rakenteelle [41]. Tämä ei tosin ole yllättävää kun otetaan huomioon se kuinka esimerkiksi Suomessakin lukion kvanttifysiikan peruskurssilla lähtökohtana käytetään juuri klassisia fysiikan malleja, vieläpä niiden ontologisessa merkityksessä [12]. Juurtuminen klassisiin käsityksiin tietysti haittaa kvanttifysiikan tieteellisen kuvan muodostumista ja teorian merkityksellistä ymmärtämistä. Tietysti tulee hyväksyä se, että klassisiin - ja semiklassisiin (kuten Bohrin atomi) malleihin nojaaminen on didaktisesti tiettyssä määrin välttämätöntä kvanttifysiikan opettamiseksi ja oppimiseksi. Tällöin tulisi kuitenkin aina ymmärtää mallien pätevyysalueet eikä attribuoida niihin vahvoja ontologisia tai episteemisiä ominaisuuksia. Luonteeltaan ne ovat siis parhaimmillaan transitionaalisia.

Historiallisia linjoja noudattaen kvanttifysiikan opetus alkaa energian ja edelleen muiden ominaisuuksien kuten liikemäärän kvanttumisesta. Opinnäytetyössään Matti Heikkinen argumentoi, että lukion

oppikirjoissa kvanttittumisen tarkastelun seurauksena luodaan esitys aalto- hiukkasdualismista, vuorovaikutuksen todennäköisyystulkinnasta ja edelleen löydetään kvanttiolio-ontologioiden muut ontologiset ominaisuudet kuten yksilöimättömyys ja olemassaolo [12].

Terminologisesti aaltohiukkasdualismi esiintyy jo varhaisessa kööpenhaminalaisessa tulkinnassa, jossa kvanttiolio-ontologian hiukkas-aaltoduaalinen luonne on sisäänrakennettuna tulkinnan muotoilussa ontologisessa merkityksessä [16]. Kvanttifysiikan varhaisissa muotoiluissa olio-ontologian painotus on milloin aalto- unitaarinen (Schrödingerin kuva) tai hiukkas- unitaarinen (Heisenbergin kuva), mutta pohjimmiltaan itse oliota ei attribuoida kummassakaan kuvauksessa ontologisessa merkityksessä kummaksikaan yllämainituista klassisista olio-ontologioista. Hämmästyttävästi molemmat kuvaukset ovat silti yhteismitallisia kvanttifysiikan johdonmukaisen muotoilun laatimisessa ja havaintojen selittämisessä. Tätä tietoa vasten on harmillista huomata, että opiskelijat ovat taipuvaisia ymmärtämään kvanttiolio-ontologiat toisaalta muutoksen alaisiksi, mutta pohjimmiltaan ontologisesti klassisten olio-ontologioiden mukaisiksi [12]. Näin olio-ontologioiden mukaiset ontologiset ominaisuudet hiipivät opiskelijoiden tulkintoihin mukaan vaikeuttaen kvanttifysiikan merkityksellisen ja käsitteellisen ymmärryksen saavuttamista. Siksi aalto- hiukkasdualismista puhuttaessa on oltava tarkka sen suhteen että milloin puhutaan teorian olioista ontologian, ja milloin mallin tasolla.

Todennäköisyystulkinnasta puhuttaessa on otettava huomioon ettei kyseessä ole kvanttifysiikan teorian kokonaisvaltainen tulkinta, vaan se ilmentää kvanttifysiikan olioiden vuorovaikutusluonteen epistemologista tai suorastaan ontologista asemaa kvanttifysiikassa. Ero olioiden vuorovaikutusluonteen epistemologisesta tai ontologisesta merkityksestä tulee ilmi jos verrataan kvanttimekaniikan statistista -ja tilastollisen joukon (ensemble) tulkintaa keskenään.

Ensemble tulkinnan tapauksessa todennäköisyysluonne on jotain joka koskee suurta identtisesti valmisteltua (tilastollista) joukkoa, joka vuorovaikuttaa kvanttimekaniikan lakien edellyttämällä tavalla tiettyssä systeemissä. Vuorovaikutukseen liittyvän ilmiön hajontaan liittyvä todennäköisyys on lakien mukaan 'universaalia', mutta vuorovaikuttavien olioiden tasolla partikulaarista. Tulkinnan mukaan vuorovaikutuksen todennäköisyysluonne on siis teorian edellyttämä epistemologinen rajoite joka liittyy olio-ontologioiden ominaisuuksiin, mutta ei aseta ehdottomia ontologisia rajoitteita vuorovaikutuslaeille.

Statistisessa tulkinnassa itse vuorovaikutuslakien tulkitaan olevan todennäköisyyslakeja. Todennäköisyyslait ovat tällöin piilomuuttujien määrittämiä, jolloin ne eivät enää ole epistemologisesti todennäköisyysluonteisia. Ontologisella tasolla vuorovaikutukset ovat kuitenkin epädeterministisiä ja

oliot säilyttävät tulkinnassa ontologisella tasolla lokaaliutensa. Näin ollen vuorovaikutuksen todennäköisyysluonne ei ole perimmiltään epistemologinen, vaan ontologinen.

Kvanttifysiikan ontologiset ja epistemologiset vivahteet ovat hyvin monimuotoisia teorian tulkinnasta toiseen. Tästä syystä ei ole perusteltua olettaa opiskelijoiden kykenevän muodostamaan johdonmukaista kuvaa kvanttifysiikan ontologisesta rakenteesta, ellei tähän kiinnitetä erityistä huomiota. Opiskelijat takertuvat mielellään visualisoitaviin ja konkreettisiin kuvauksiin joita tulkinnat tarjoavat, kuitenkin käsittäen kvanttifysiikan klassisen fysiikan ontologisen rakenteen ehdoilla [41]. Mieli käyttää hiukkas- ja aaltounitaarisia kuvauksia kvanttifysiikan opetuksessa tulee ilmi kun se tapahtuu komplementaarisuuden periaatteen ehdoilla, ymmärtäen klassisten olio-ontologioiden rajoitukset. Molemmille lähestymistavoille on yhteistä, että ne osoittavat klassisten olio-ontologioiden riittämättömyyden luonnonilmiöiden selittämisessä [12].

4. Tutkimusasetelma

4.1. Tutkimuskysymykset

Tarkasteltaessa opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikasta on mielenkiintoista tarkkailla että minkä laatuista klassisten olio-ontologioiden hyödyntäminen kvanttimekaniikan ilmiöiden selittämisessä opiskelijoilla on, missä määrin kvanttiolio-ontologia liudentuu klassisiin olio-ontologioihin, mitä ontologisia ominaisuuksia oliolle mielletään ja kuinka pysyvinä ne nähdään viitekehyksestä toiseen. Näihin kysymyksiin tämä opinnäyte pyrkii vastaamaan selvittämällä millaisia ovat opiskelijoiden käsitykset kvanttifysiikan ontologisesta ja episteemisestä kokonaiskuvasta.

Tässä tutkimuksessa rakennetaan edelleen kuvaa siitä minkälaisia ovat opiskelijoiden käsitykset kvanttifysiikasta ja sen virittämästä todellisuuskuvasta. Luonteva tapa tutkia näitä käsityksiä on käyttää tunnettuja kvanttifysiikan perusolioita eli fotoneita ja elektroneita objekteina, joiden kuvailun kautta kvanttifysiikan ontologinen rakenne tulee ilmaistuksi. Tässä suhteessa tutkimuksessa on mielekästä kiinnittää huomiota opiskelijoiden ilmaisemiin klassisen -ja kvanttifysiikan olio-ontologioiden ontologisten ominaisuuksien samaistuksiin ja erityisyyksiin. Lopulta opiskelijoiden ilmaisemat mallit arvioidaan suhteessa tieteellisesti hyväksyttäviin kvanttifysiikan olio-ontologia -malleihin, jotka edustavat ideaalia johon opetuksessa pyritään.

Ontologisen rakenteen tutkimiseksi tarvittiin kokeellinen viitekehys, jossa kvanttifysiikan olio-ontologioiden ominaisuudet ovat monipuolisesti edustettuina. Kokeeksi valikoitui kaksoisrakokoe siitä syystä, että kvanttifysiikan olio-ontologioille tyypilliset erityislaatuudet suhteessa klassisiin olio-ontologioihin ovat kokeen erilaisten tulkintojen kannalta keskeisessä asemassa.

Ontologiset ominaisuudet joita tässä työssä pyritään kartoittamaan rajoittuvat hiukkaskuvaan, aaltokuvaan, lokaaliuteen, rataisuuteen, olemassaoloon, realismiin, ja yksilöityvyyteen. Erityistä huomiota tullaan kiinnittämään siihen miten ominaisuudet esiintyvät yhdessä ja kuinka johdonmukaisiksi kokonaisiksi malleiksi opiskelijat niitä jäsentävät. Aikaisemmat tutkimukset [41] tuovat esiin että opiskelijat mieltävät erilaisia ontologisia ominaisuuksia fotoneille ja elektroneille. Erityisesti fotonit saavat osakseen aaltomaisia attribuutteja kun taas elektronit ymmärretään hiukkasmaisina. Teorian tasolla eroa näiden kahden olion ontologisella luonteella ei ole. Tämän duaalin eriytyvyyden problematiikan

tarkempi tutkimus ei ole tämän työn keskiössä vaikka siitä voidaankin nähdä viitteitä opiskelijoiden vastauksissa.

Toisaalta tutkimus pyrkii tuomaan uusia kvantitatiivisia lähestymistapoja kvanttifysiikan käsitteellisen tiedon tutkimukseen. Kyselytutkimuksessa käytettävän lomakkeen väitteiden ontologista sisältö operationalisoidaan. Tästä kvantitatiivisesta aineistosta tuotetaan edelleen tunnuslukuja, jotka ilmentävät tilastollisen luotettavasti opiskelijoiden ilmaisemaa käsitystä kvanttiolio-ontologioiden ontologisesta rakenteesta. Perinteisten kvantitatiivisten menetelmien lisäksi tutkimuksessa sovelletaan opiskelijoiden vastauksiin *faktorianalyysi* -menetelmää. Motivaationa tämän kokeilevan menetelmän käytölle on opiskelijoilta yhtenäisten käsitteekategorioiden löytäminen ja tulkitseminen. Faktorianalyysi edellyttää suurta otosta ollakseen mielekäs analyysimenetelmä. Tämä osin selittää miksi menetelmää ei olla voitu aikaisemmin soveltaa vastaavassa tutkimuksessa, sillä suuriotoksiset kvanttifysiikan opetuksen tutkimukset ovat harvinaisia [3]. Kvantitatiivisten työkalujen hyödyntäminen kvanttifysiikan käsitteellisen ymmärtämisen tutkimuksessa on vielä suhteellisen harvinaista, jonka takia kyseisten menetelmien koetteleminen ja käytön kriittinen arviointi on fysiikan opetuksen metodologisen tutkimuksen kannalta itsessään mielekästä.

Tutkimusongelmat voidaan tiivistää seuraavasti:

1. Millaisia ovat opiskelijoiden käsitykset kvanttiolio-ontologioista?

1.1. Mitä ontologisia ominaisuuksia opiskelijat mieltävät kvanttiolio-ontologioille?

1.2. Mitkä ontologisten ominaisuuksien kategoriat esiintyvät yhdessä opiskelijoiden kvanttiolio-ontologioissa?

2. Miten johdonmukaisia ontologiat ovat ja noudattavatko ne tiettyjä olio-ontologioita?

2.1. Millaisia yhtenäisiä kvanttiolio-ontologia -malleja opiskelijoissa esiintyy?

2.2. Millä tavalla opiskelijoiden käsittämien kvanttiolio-ontologiakuvien ontologiset ominaisuudet muuttuvat eri konteksteissa?

4.2. Aineisto ja tutkimuksen kulku

Tutkimusaineisto kerättiin verkkokyselyllä (liite A) Helsingin yliopiston kvanttimekaniikan kursseilta Kvanttifysiikan perusteet (Kvaper, N=90), Fysiikan käsitteet ja rakenteet III (FKR-III, N=25) ja Quantum mechanics I (QM-I, N=28).

KvaPer -kurssi edustaa perinteistä kvanttifysiikan perusopetuksen kurssia, jossa oppilaat tutustuvat kvanttifysiikan alkeisiin ja aaltomekaniikkaan. Kurssi on ensimmäinen pakollinen yliopistotasoinen kvanttifysiikan kurssi, joka ajoittuu fysiikan opintojen ensimmäiselle tai toiselle vuodelle.

QM-I -kurssi on teoreettisten fyysikoiden kolmannen vuoden kurssi, jossa käsitellään aaltomekaniikan aihekokonaisuutta matemaattisesti tarkemmin ja tutustuen joihinkin kvanttifysiikan käsitteellisiin erikoisuuksiin kuten Heisenbergin epämääräisyysperiaatteeseen formaalisti tarkemmin kuin peruskurssilla on ollut mahdollista. Kurssin pääpaino siirtyy kuitenkin kvanttifysiikan standardiin Diracin formalismiin ja sen soveltamiseen erilaisissa systeemeissä. Kurssilla ei kiinnitetä erityistä huomiota kvanttifysiikan käsitteelliseen sisältöön muuten kuin mikä on implisiittistä.

FRK-III on fysiikan opettajille suunnattu syventävien opintojen kurssi, jonka pääpaino on kvanttifysiikan käsitteellisen rakenteen ja kvanttifysiikan käsitteiden hahmottamisessa ja jäsentämisessä. Kurssilla ei perehdytä peruskurssia syvemmin kvanttifysiikan matemaattiseen formalismiin, vaan keskitytään järjestämään kvanttifysiikan käsitteellinen sisältö siten, että se muodostaa toimivan ja sisäisesti johdonmukaisen käsitteellisen kokonaisuuden. Kurssi ajoittuu opettajaopiskelijoiden neljännelle tai viidennelle opiskeluvuodelle. Kaikilla opiskelijoilla on taustalla vähintään kvanttifysiikan perusteiden kurssi, mutta riippuen yksittäisten opiskelijoiden sivuainevalinnoista, pääaineen vaihtamisesta ja harrastuneisuudesta joukossa on myös QM-I ja jopa sen jatkokurssin suorittajia.

Opiskelijoita pyydettiin vastaamaan kyselyyn selainpohjaisella E-lomakkeella, jonka oppilaat saivat täyttää kotonaan tavanomaisten kurssiin liittyvien laskuharjoitusten tai muiden erityisten kurssin suorittamiseen liittyvien harjoitusten yhteydessä. Tavallisesti kyselyn asiallisesta täyttämisestä annettiin laskuharjoitusten osalta ylimääräinen kurssipisteisiin laskettava harjoituspiste, jonka merkitys kurssiarvosanan kannalta ei ollut merkittävä, mutta ilmiselvästi motivoi opiskelijoita vastaamaan, sillä 88% opiskelijoista täytti kyselyn silloinkin kun se ei kurssin suorittamiseksi ollut välttämätöntä. Kursseilla, joissa ei ollut tavanomaisia laskuharjoituksia tai kurssipisteitä ei käytetty, kyselyn täyttämistä

pidettiin kurssivaatimuksena, jolloin saatettiin taata mahdollisimman suuri vastaajien osuus kurssien osanottajissa.

Kysely koostui 63 Likert5 -muotoisesta kohdasta, joista jokainen sisälsi jonkin väittämän jonka kanssa opiskelija oli yhtä tai eri mieltä asteikolla väliltä 1-5, jossa vastaamalla "1", oppilaat ilmoittavat olevansa täysin eri mieltä ja vastaamalla "5" he ilmoittavat olevansa täysin samaa mieltä väittämän kanssa. Tämä muodosti mittarin kvantitatiivisesti käsiteltävän osan. Tämän lisäksi kyselyssä oli 5 avointa kysymystä, joita saatettiin käyttää kvalitatiivisen tiedon saamiseksi, jota ei kuitenkaan tässä nimenomaisessa tutkimuksessa hyödynnetty. Kyselyn väittämät jakautuivat aihepiireiltään kahteen osan, joista ensimmäisessä osiossa väittämät koskivat kvanttiolio-ontologioiden ontologisia piirteitä abstraktion tasolla ilman viitekehystä ja toisessa osiossa kvanttiolio-ontologioiden ominaisuuksia tarkasteltiin kaksoisrakokokeessa havaittavien ilmiöiden viitekehyksessä.

Tutkimuksen toteuttaja oli tietoinen Tutkimuseettisen neuvottelukunnan asettamista ohjeista ja suosituksista. Kaikki tutkimukseen osallistuvat henkilöt olivat vapaaehtoisia ja heidän suostumuksensa osallistumiseen pyydettiin kirjallisena. Empiirisen aineiston keräämisessä ja käsittelyssä sitouduttiin kunnioittamaan osallistujien anonymiteettia ja muita oikeuksia. Tutkimus ei häirinnyt opetuksen toteutusta tai oppimistavoitteiden saavuttamista. Osallistujille taattiin myös mahdollisuus esittää kysymyksiä tutkimukseen liittyen ennen tutkimusta ja sen aikana. Osallistujille tiedotettiin tutkimuksen kulusta ja heillä on mahdollisuus tarkastella heistä koottua aineistoa.

4.3. Ontologisten elementtien operationalisointi

Merkityksellisen kvantitatiivisen datan tuottamiseksi kyselylomakkeen väittämien ilmentämä ontologinen sisältö täytyi analysoida ja operationalisoida edelleen kvantitatiiviselle analyysille sopivaksi. Hyödyntämällä yhteyttä väitelauseiden ilmentämien kvanttiolio-ontologioiden ontologisten ominaisuuksien ja tunnettujen ontologisten kategorioiden välillä, oli mahdollista määritellä yksittäisen väitteen sisältämä ontologinen sisältö ontologisten kategorioiden mukaan. Tätä yhteyttä hyödyntämällä oli mahdollista eritellä väitteiden ilmentämiä kvanttiolio-ontologioiden ontologisia piirteitä ja jakaa ne seitsemään negatiivis-positiiviseen käsitepariin, jotka kuvasivat olio-ontologian ontologisia ominaisuuksia. Tähän perustui tutkimuksessa käytettävän kvanttiolio-ontologiarakennetta mittaavan mittaimen, kyselylomakkeen, toimintaperiaate. Kun kysymyksien väittämiin viittaavat ontologiset peruselementit tunnettiin, voitiin tiettyihin väittämien ontologisiin ominaisuuksiin viittaavista Likert-arvoista päätellä opiskelijan taipumus mieltää ko. ontologisen ominaisuuden kuuluvan heidän

ymmärtämälleen kvanttiolio-ontologialle. Kyselyn kattamista erityisistä ontologiaelementeistä valittiin seuraavat ontologiset ominaisuudet:

A = Klassinen hiukkasontologia	B = Klassinen aalto-ontologia
C = Lokaalius	D = Lokaalius-negatiivinen
E = Rata	F = Rata-negatiivinen
G = Olemassaolo	H = Olemassaolo-negatiivinen
I = Hiukkasontologia-negatiivinen	J = Agnostismi
K = Yksilöityvyys	L = Yksilöityvyys-negatiivinen
M = Realismi	

Lopullinen varsinaisten ontologisten kategorioiden määrä oli seitsemän, minkä lisäksi tunnistettiin kuusi komplementtista kategoriaa, jotka saatettiin tulkita kieltomuotoiseksi muunnelmaksi alkuperäisistä ontologisista kategorioista. Ainoa puuttuva kieltomuotoinen kategoria oli “aalto-ontologia-negatiivinen”. Tämä johtui siitä, että kyselytutkimuksessa ei ollut ainoatakaan klassista aalto-ontologiaa suoraan kiistävää väittämää.

4.4. Kvanttiolio-ontologiamallien luokittelu

Noudatellen Kidd et al. (1988) [42] esittämiä historiallisia kvanttiolio-ontologiamalleja, saatettiin koota viisi erilaista kvanttiolio-ontologiamallia joihin liittyi eri ontologiset ominaisuudet kyselyn mittaamista A-M ontologiakategorioista. Kvanttiolio-ontologiat ja niihin liittyvät ontologiset kategoriat ovat seuraavat:

Klassinen hiukkasolio-ontologia	A, C, E, G
Aaltopakettimalli	B, D, F, G, J
Realistinen semiklassinen aaltohiukkasdualismi	A, D, E, G, M
Antirealistinen aaltohiukkasdualismi	D, F, H, J
Todellinen kvanttiolio-ontologia	D, F, H, J, L

Selvittämällä vastaajan kvanttiolio-ontologiaan liitetyn ontologiset ominaisuudet ja tarkastelemalla niitä rinnakkain yllä esiteltyjen Kidd et al. (1988) [42] historiallisten kvanttiolio-ontologioiden kanssa voidaan saada tietoa siitä, noudattaako vastaajan hyödyntämä kvanttiolio-ontologiamalli historiallisia malleja ja käytetäänkö sitä linjakkaasti kyselyyn vastatessa.

4.5. Faktorianalyysi

Faktorianalyysi on tilastollinen analyysimenetelmä, jolla kuvataan aineiston mitattavien muuttujien hajontaa pienemmällä määrällä selittäviä muuttujia [43]. Tarkoituksena on löytää ja tulkita havaittavissa olevaa muuttujajoukkoa piilevät muuttujat eli *faktorit*. Faktorianalyysi on laajasti käytössä oleva analyysimenetelmä jota hyödynnetään erityisesti ihmistieteissä, kuten psykologiassa kyselytutkimuksien analyysissa, mutta menetelmällä on potentiaalia monimutkaisten kompleksisten systeemien mallintamisessa.

Faktorianalyysiä on olemassa kahta eri tyyppiä: Eksploratiivista (etsivää) faktorianalyysiä ja konfirmatorista (vahvistavaa) faktorianalyysiä. Eksploratiivisessa faktorianalyysissä tavoitteena on löytää ja tulkita aineistoa mahdollisesti selittävät piilevät faktorit. Tässä analyysissä tutkija ei tee *a priori* oletuksia mahdollisista piilevistä faktoreista esimerkiksi perustuen teoreettiseen malliin joka koskee mitattavaa ilmiötä jota aineistosta on selvitetty. Analyysin tuloksena voidaan selvittää muuttujajoukon faktorit, jotka ovat tilastollisesti mielekkäimmät.

Konfirmatorinen faktorianalyysi on luonteeltaan monimutkaisempi testi, jolla tutkitaan hypoteettisen faktorirakenteen kelvollisuutta tunnetun muuttujajoukon mitatun hajonnan selittämisessä teoretisoidun faktorirakenteen avulla verrattuna muuttujajoukon piileviin faktoreihin. Konfirmatorisessa faktorianalyysissä pyritään saamaan tilastollista vahvistusta ennalta määritellylle hypoteettiselle piilevälle faktorirakenteelle, joka voisi olla esimerkiksi teoreettinen malli joka koskee mitattavaa ilmiötä, jota aineistosta tutkitaan.

Tavallisesti faktorianalyysi etenee neljässä vaiheessa[43]:

1. Lasketaan muuttujien väliset kovarianssi- ja korrelaatiomatriisit
2. Matriisin ilmentämät faktorien lataukset (toisinaan puhutaan myös voimakkuudesta tai vahvuudesta) arvioidaan
3. Kovarianssi- ja korrelaatiomatriisit kierretään matriisitoimituksin siten, että faktoreiden lataukset tulevat paremmin luettaviksi
4. Selvitetään yksittäisten havaintojen komponenttipisteet (koordinaatit uuden löydettyjen faktoreiden mukaan)

Motivaatio käyttää kyseistä analyysimenetelmää opiskelijoiden kvanttifysiikan käsite-rakenteiden tutkimuksessa on perusteltavaa kvanttifysiikan toisaalta johdonmukaisen ontologisen rakenteen, mutta siitä tehtävien monipuolisten episteemisten tulkintojen perusteella.

Kvanttifysiikka ja sen erilaiset tulkinat muodostavat itsessään tunnetut verkottuneet ja strukturoidut käsitteiden verkostot, joiden mukaan konfirmatorisen faktorianalyysin edellyttämät faktorit voidaan jaotella verrattain luotettavasti. Lisäksi kyselylomakkeen väitteiden väliset ontologiset merkityserot ovat varsin selkeitä, jolloin eksploraatiivinen faktorianalyysissä löydettävien piilotetujen faktorien voidaan olettaa ilmentävän suhteellisen selkeästi niiden sisältämiä vastaajien käsityksiä ontologis-episteemisistä ominaisuuksista, jos niitä vastaajalla on.

Tutkimuksessa hyödynnettiin SPSS ohjelmistoa ja siihen kuuluvaa pääkomponentti- analyysityökalua (faktorianalyysin alakäsite²). Aineistosta kerätyt kvantitatiiviset vastaukset (kysymykset 1-16 ja 30-67) kirjattiin SPSS:ään. Tämän jälkeen elementtien vastausten asteikko asetettiin ordinaaliseksi (ordinal), sillä vaikka vastaukset ovatkin muutettu intervalliasteikolle, ei voida mitenkään todentaa, ovatko intervallien suuruuden vertailupisteestä riippuvia tai lineaarisia. Tällöin koettiin tarkoituksenmukaiseksi käyttää juoksevaa ordinaaliasteikkoa. Menettely oli myös siinä mielessä tarkoituksenmukainen, että yksittäisiin väittämiin tehty vastaukset olivat likipitään normaalijakautuneet, jolloin on perusteltua olettaa, että huipusta merkittävästi poikkeavat vastaukset katoavat liki eksponentiaalisesti huipun molemmiin puoliin.

SPSS:n asetuksina eksploraatiiviselle faktorianalyysille käytettiin varimax rotaatiota, jossa löydettävät faktorit ilmoitetaan maksimaalisena varianssina neliöityjen sarake- ja rivimuuttujien välillä. Tällä tavoin saatettiin erotella alkuperäiset muuttujat löydettyjen faktoreiden mukaan. Vastaajan jättämät tyhjät vastaukset jätettiin huomioimatta faktoreiden selvityksessä, sillä Kvaper -kurssin suhteellinen suuruus verrattuna muihin kursseihin olisi voinut vinouttaa pienempien kurssien vastaajien vastausten keskinäistä eheyttä. SPSS: asetuksina konfirmatoriselle faktorianalyysille käytettiin SPSS:ssä k-klusterointi menetelmää, jossa ennalta valitut klusterit olivat luvun 4.5 historiallis-tieteelliset kvanttiolio-ontologiamallit. Tyhjät vastaukset jätettiin jälleen huomioimatta analyysissä.

² Erilaisia vastaavuussuhteita pääkomponenttianalyysin ja faktorianalyysin välillä tunnetaan, mutta tässä työssä rajoitutaan puhumaan faktorianalyysistä ja pääkomponenttianalyysistä vaihdannaisesti kiinnittämättä erityistä huomiota näiden erityisluonteisiin. Pääkomponenttianalyysin ja faktorianalyysin eroista voi tarkemmin lukea ks. Metsämuuronen 2011 [43]

5. Tulokset

5.1 Ontologisten ominaisuuksien mielekkyydet

Kyselylomakkeen kysymyksistä selvitettiin vastauksista keskiarvot kurseittain. Kysymysten vastausten keskiarvoista laskettiin ontologisen ominaisuuden mielekkyyden (OOM) tunnusluku siten, että kaikkien tiettyyn ontologiseen kategoriaan viittaavien kysymysten keskiarvot laskettiin yhteen ja normalisoitiin mielekkyyden huippuarvoon 5. OOM:ien A-M tunnusluvut kerättiin taulukkoon 2. Taas erot kurssien välillä olivat enimmäkseen pieniä, alle hajonnan puolikkaan päässä toisistaan. Kurseista erityisesti erottui ainoastaan KvaPer, jonka suorittajista huomattavasti suurempi osa ilmensi epävarmuutta väittämien suhteen, joka näkyi poikkeuksellisen korkeana 3 -vastauksien osuutena suhteessa muihin kurseihin (mm. kysymykset 34, 35, 36, 38). Muutenkin KvaPer:n vastaajat vastasivat muita kurseja innokkaammin välillä 2-4, välttämällä äärimmäisen vahvoja kannanottoja. Tämä ero näkyy myös OOM:ien pienempänä keskihajontana KvaPer -kurssin osalta suhteessa QM I ja FKR III kurseihin.

Lukuunottamatta yksittäisiä kysymyksiä vastausten jakaumat olivat yksihiippuisia, jolloin keskiarvo saatettiin todeta turvalliseksi tunnusluvuksi. Bipolaarisia tai täysin satunnaisjakautuneita kysymyksiä olivat kysymykset 6, 34, 40, 41 ja 45. Kurssien välillä oli pientä vaihtelua vastauksien keskiarvosta erojen ollessa alle yhden keskihajonnan päässä toisistaan (σ välillä 0,7 - 1,3 kysymyksestä riippuen). Hajonnat olivat kategorioiden voimakkuuksien nähden suuria, σ välillä 0,5 - 2,3 kategoriasta riippuen. Niin kysymysten kuin kategorioiden osalta suhteellinen virhe oli suuri. Tämän voidaan tulkita johtuvan siitä, että suhteellinen ero yhtä- ja eri mieltä olemisen välillä (2 \rightarrow 4) on aritmeettisesti suuri suhteessa absoluuttiseen tunnusluvun maksimiarvoon. Vaikka yksittäisen väittämien vastausten jakaumat olivat hyvinkin polaroituneita ja saivat keskiarvoja kauempana indifferenttiä vastausta "3", itse ontologiset ominaisuudet eivät eriytyneet tunnuslukujen keskiarvojen tasolla voimakkaasti.

Kyselyaineiston mukaan ontologisten kategorioiden A-K mielekkyydet kurseittain olivat seuraavanlaiset:

Kurssi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
KvaPer	2,91	3,04	2,73	3,06	3,03	3,42	3,09	2,66	3,49	3,21	2,67	2,89	3,38
FKR III	2,88	2,68	2,56	2,90	2,93	3,43	3,12	2,51	3,34	3,13	2,88	2,91	3,37
QM I	2,64	2,93	2,37	3,00	2,85	3,24	2,76	2,17	3,14	2,96	2,38	2,58	3,20

Taulukko 2 : Ontologisten ominaisuuksien voimakkuus -matriisi

Kurssi	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	ΔE	ΔF	ΔG	ΔH	ΔI	ΔJ	ΔK	ΔL	ΔM
KvaPer	1,69	1,30	1,29	1,07	1,15	0,94	0,49	1,06	0,44	1,33	0,63	0,66	0,89
FKR III	2,13	1,58	1,78	1,34	1,36	1,24	0,60	1,49	0,50	1,86	0,83	0,89	1,26
QM I	2,25	1,62	1,86	1,33	1,50	1,41	0,67	1,48	0,50	2,03	0,84	0,83	1,17

Taulukko 3 : Ontologisten ominaisuuksien voimakkuuksien keskihajonta -matriisi

Taulukosta 1 voidaankin nähdä, että OOM:ien vahvuuslukujen keskiarvo on 2,98, joka voisi ilmentää ettei opiskelijoilla ole voimakkaita käsityksiä kvanttiolio-ontologian ontologisista ominaisuuksista. Katsellessa taas taulukon 2 keskihajontalukuja OOM:ien vahvuusluville voidaan nähdä, että lukuunottamatta kategorioita G, I, K ja L, vahvuuslukujen keskihajonnat ovat suuria suhteessa absoluuttiseen vahvuusluvun aritmeettiseen keskiarvoon. Vaikka OOM -vahvuusluku on ilmeisen neutraali, se kätkee sisäänsä polaareja vastauksia puolin, joka selittää suuren keskihajonnan kategorian osalta.

5.1.1 Ontologisen ominaisuuden mielekkyyden -tunnusluvut

Ontologisten ominaisuuksin mielekkyyden (OOM) -tunnusluvuista havaittiin, että kategoriat G, I, K ja L olivat voimakkaan neutraaleja ominaisuuksia, joiden keskiarvo oli lähellä indifferenttiä arvoa kolme ja joiden keskihajonta oli pientä. Tästä voidaan päätellä, että kyseiset ontologiset ominaisuudet, eli olemassaolo (ka. $3,0 \pm 0,6$), yksilöityvyys (ka. $2,9 \pm 0,8$) ja hiukkasontologia -negatiivisuus (ka. $3,3 \pm 0,5$) eivät ole voimakkaasti jäsenyntyneitä opiskelijoiden käsittämässä kvanttiolio-ontologiassa.

Kvanttiolio-ontologian ominaisuuteen “olemassaolo” viittaavia kysymyksiä yhdisti ominaisuuden kömpelö artikulaatio suhteessa kvanttifysiikan yleiseen kielenkäyttöön. Monet kyselyyn vastanneet esittivät avoimissa kommenteissa voimakasta kritiikkiä väittämissä käytetyistä sanavalinnoista. Olemassaolon puuttuminen kvanttiolio-ontologialta, saati miltään olio-ontologialta on arkilogiikan vastaista jos olemassaolo ymmärretään olion substantiaalisena eksistenssin merkityksessä. Kvanttimekaniikan olio-ontologian ominaisuus “olemassaolo” on kuitenkin kietoutunut vahvasti

fysikaalisen lokaaliuden periaatteeseen, eikä sillä ole tekemistä arkiperäisen olemassaolon käsitteen kanssa. Tämä käsitteiden epämääräisyys epäilemättä aiheutti epävarmuutta, joka havaitaan ominaisuuden mielekkyyden heikon jäsentyneisyyden kautta.

Itse lokaaliuden periaate ei ole keskeisessä asemassa siinä mitä tulee kvanttifysiikan formalismiin. Tästä voi selittää sen, ettei ominaisuus eriydy voimakkaasti kvanttiolio-ontologian ontologisena ominaisuutena perustasolla toisin kuin jotkin muut ontologiset ominaisuudet kuten aaltomaisuus. Tämä ominaisuuksien mielikuviin liittyvän eroavaisuuden voidaan nähdä johtuvan osin siitä, että monilla muilla ontologisilla ominaisuuksilla on kvanttifysiikan perustasolla formaaleja ilmentymiä kuten, aaltofunktio -konstruktio aaltomaisuudelle, tai ominaisuuksiin liittyy voimakkaita kuvallisia havainnollisia malleja, kuten hiukkas -konstruktio hiukkasmaisuudelle.

Hiukkasnegatiivisen kategorian I OOM -tunnusluvun havaittu neutraalius oli yllättävä löydös. Huomionarvoista on, että tunnusluku lipui neutraalimmaksi KvaPeri:lta QM-I -kurssille. KvaPer:n osalta OOM -tunnusluku oli $(3,49 \pm 0,44)$, joka tekee kategoriasta ainoan joka on kriittisesti yli ka. 3 yhden keskihajonnan virhemarginaalilla. Tästä syystä on mahdollista argumentoida, että KvaPer -kurssin osalta opiskelijat eivät tyypillisemmin miellä kvanttiolio-ontologiaa klassisen hiukkaskuvan mukaan.

Klassista hiukkaskuvaa ilmentävä kategoria A oli voimakkaan hajaantunut (ka. $2,8 \pm 2,0$) vaikka komplementaarinen kategoria I oli hajonnaltaan suhteellisen kapea. Jostain syystä opiskelijat vastasivat polaarisesti väittämiin joissa viitattiin positiivisesti klassiseen hiukkaskuvaan kun taas negatiivinen väittämän sanamuoto tuotti indifferenttejä tai varovaisen hyväksyviä vastauksia. Kvanttifysiikan opetuksessa luonnollisesti käytetään sanaa hiukkanen yksittäisestä kvanttioliosta kun taas olion kutsuminen kvanttifysiikan kontekstissa aalloksi on parhaimillaankin harvinaista.

Terminologian tasolla aidosta unitaarista kvanttiolio-ontologiasta ei ole olemassa yhtenäistä yleisesti hyväksyttävää termiä, joka ilmenee siinä että kvanttiolio-ontologiaa kutsutaan klassisten olio-ontologioiden mukaan attribuoituja termejä hiukkanen ja aalto. Tämä kielellinen nyanssi voi osaltaan selittää sitä, miksi termin hiukkanen ja toisaalta termin aalto esiintyminen väittämissä tuottaa ambivalentteja vastauksia. Opiskelijat saattavat toisinaan ymmärtää termin ”hiukkanen” sellaisessa merkityksessä, että se viittaa ainoastaan olion kategorisointiin, ei niinkään ontologisiin ominaisuuksiin. Tällöin johtopäätösten vetäminen kategorian A osalta on kerätyn aineiston perusteella mieletöntä. Negatiivisen kategorian I pieni hajonta ja neutraalin hyväksyvä OOM -tunnusluvun lopputulos ja erilaisuus kategorian A kanssa selittyy siinä, että vasta väittämän kieltäessä kvanttiolio-ontologian hiukkasmaisuus ymmärretään sen ontologisessa merkityksessä, ei terminologisessa.

Yksilöityvyyteen liittyvien kategorioiden K ja L OOM -tunnuslukujen voimakas neutraalius ja pieni hajonta ei selity samalla terminologis-kielellisellä epäselvyydellä kuin aikeisemmat kategoriat. Yksilöityvyydellä ei ole merkityksen tasolla vaihtelevuutta klassisen fysiikan kielenkäytöstä kvanttifysiikkaan, eikä termiin liity ilmeisiä loogisia kaksoismerkityksiä kuten olemassaolon tapauksessa. Erikoista on myös se, että OOM -tunnusluvut K ja L ovat kyllä molemmat keskiarvoltaan alle neutraalin hyväksynnän, jonka pitäisi tarkoittaa sitä että opiskelijat yhdenaikaisesti kieltävät yksilöityvyyden sekä yksilöimättömyyden. Tässä on ilmiselvä ristiriita. Havainto voidaan ymmärtää siten joko siten, että opiskelijat käsittävät kvanttiolio-ontologian yksilöityvyyden muutoksen alaisena ominaisuutena, kyselylomakkeen väittämien muotoilu luo kyseisen artefaktin tai yksilöityvyys ei ole jäsentynyt ontologinen ominaisuus vastaajien kvanttiolio-ontologiassa. Ensimmäinen vaihtoehdon oikeellisuudesta pitäisi näkyä viitteitä faktorianalyysissä jos yksilöityvyyden ja yksilöimättömyyden mieltäminen eri väittämissä on säännönmukaista. Toista vaihtoehtoa voidaan arvioida tarkastelemalla lomakkeen väittämiä ja arvioimalla ontologisten ominaisuuksien mahdollisia päällekkäisyyksiä jotka saattavat vaikuttaa vastauksiin.

Jos tarkastellaan väittämiä 31, 34 ja 36, huomataan, että väittämät jotka viittasivat ontologisiin kategorioihin K ja L ilmenivät usein kategorioiden C ja D, eli lokaaliuden ominaisuuden kanssa. Kategoriat C ja D olivat alttiimpia polarisoituneemmille vastauksille kuin K ja L näistä erotettuna. Esimerkiksi väittämässä 34 käytettiin myös sanamuotoa *“hajonta selittyy vain siten, että ajatellaan elektronien olevan paikallistumattomia ja yksilöimättömiä olioita”*, jossa lokaalius asetetaan alisteiseksi ominaisuudeksi yksilöimättömyydelle. Tämä saattaa hämärtää ontologisen ominaisuuden itsenäistä mielekkyyttä, jonka takia väittämät joissa viitataan yksilöityvyyteen ovat jakautuneet paljon tiiviimmin keskiarvon 3 ympäristöön.

Laveammin jakautuneista OOM -tunnusluvuista on vaikeampi tehdä johtopäätöksiä vastaajien käsittämistä kvanttiolio-ontologian ontologisista ominaisuuksista keski -ja hajontalukujen perusteella. Korkeat hajontaluvut sallivat monenlaisten kvanttiolio-ontologiamallien olemassaolon vastaajien joukossa. Näiden mallien tunnistaminen tai jonkin kokonaan toisenlaisen vastausstrategian löytäminen edellyttää toisenlaisia menetelmiä, kuten faktorianalyysia.

5.2. Faktorianalyysin tulokset

Aineistolle suoritettiin eksploratiivinen faktorianalyysi (dimension pienennys) samalla SPSS -työkalulla. Asetuksina käytettiin rotaatiolle varimax rotaatiota (maksimaalinen varianssi syötetyiden neliöityjen sarake ja rivien muuttujien välillä) jolloin voitiin erotella alkuperäiset muuttujat eroteltujen faktoreiden mukaan. Tyhjät arvot poistettiin pareittain. Scree -kuvaajasta pääteltiin jyrkkyyden perusteella viiden ja kymmenen faktorin tuottavan sisäisesti koherenteimmat faktoreiden yhdistelmät.

Kahdella erilaisella faktorisaatiolla saatiin tuotettua väittämien ryppäitä, joiden sisältämät väittämät olivat keskenään läheisempiä kuin toisilla tavoilla faktoroiduissa reduktioissa. Tarkastellessa viiden faktorin reduktiota, huomattiin ryppäiden sisällä sellaisia yhdistäviä piirteitä, jotka selkeästi viittasivat voimakkaasti opiskelijoiden vastausstrategioihin väittämien ontologisten ominaisuuksien yhtenäisyyden tasolla.

Kymmenen faktorin reduktiolla löydettiin toisaalta yhtenäisiä ryppäitä, mutta ryppäät vaikuttivat olevan faktoriin nro. 5 saakka samat kuin viiden faktorin reduktiolla viimeisen viiden faktorin ollessa säädeltyjä komplementaaristen väittämäparien mukaan, jotka ovat toisaalta tilastollisesti merkittäviä, mutta tämän tutkimuksen kannalta epämielenkiintoisia ja kontingenteja. Tästä syystä kymmenen faktorin reduktion faktorisaatiota ei katsottu mielekkääksi analysoida tarkemmin sen ollessa ontologisen sisällönsä puolesta identtinen viiden faktorin faktorisaation kanssa.

5.2.1. Faktorianalyysin faktorointien tulkinta ja nimeäminen

Käyttäen eksploratiivista faktorianalyysia vastauksista voitiin tunnistaa viiden faktorin reduktiolla selkeitä sisäisesti johdonmukaisia väittämäryppäitä. Viideksi faktoriksi tunnistettiin seuraavanlaiset löyhästi nimetyt faktorit:

1. Paikallistuvuus - aaltofunktio - interferenssi
2. Klassinen hiukkasolio-ontologia
3. Heisenbergin epätarkkuusperiaate
4. Olemassaolo - interferenssi - vuorovaikutus
5. Heikko duaali

Faktorit tulkittiin niiden sisältämien läheisten (katkaisuarvona $\alpha > 0,4$) väittämien perusteella.

Faktori nro. 1 : paikallistuvuus - aaltofunktio - interferenssi -faktori

Faktori nro. 1 käsitti seuraavat kyselylomakkeen väittämät:

- Fotonit ovat paikallistuneita, mutta eivät jatkuvasti olemassaolevia
- Elektronien aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton
- Aaltofunktio määrää todennäköisyyden, jolla fotoni paikallistuu tietyssä paikassa
- Interferenssi-ilmiö vaatii elektronien tapauksessa kvanttimekaanisen selityksen, joka pohjautuu kunkin elektronin aaltofunktioon ja sen interferenssiin itsensä kanssa. ("elektroni menee kummankin aukon läpi")
- Valo koostuu pistemäisistä fotoneista, jotka ohjautuvat eri kohtiin aaltofunktion määräämällä tavalla. Kunkin fotonin aaltofunktio käyttäytyy raoissa aallon tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön. (Ts. "fotoni menee molempien aukkojen läpi")
- Havainnon (tai mittaustapahtuman) paikallistuminen on tilastollinen, ennakoimaton, ilmiö ja aaltofunktio määrää siiheen liittyvän todennäköisyysjakauman
- Elektronit ohjautuvat eri kohtiin aaltofunktion määräämällä tavalla. Aaltofunktio käyttäytyy raoissa aallon tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön
- Fotonit ovat paikallistumattomia tai laaja-alaisia olioita. Fotoniin liittyvää interferenssi ilmiötä raoissa voidaan kuvata todennäköisyyskentällä, joka on superponoituva. K.o. kenttä määrää milloin ja missä paikallistumaton fotoni paikallistuu (mitataan)

Väittämät viittaavat voimakkaasti kvanttiolio-ontologian spatiaaliseen luonteeseen, interferenssiin ja paikallistuvuuteen. Toisaalta faktoria yhdistää interferenssiin liittyvät väittämät, joihin yritetään sovittaa väittämien tasolla erilaisia ontologisilla ominaisuuksilla varustettuja olio-ontologioita. Kuten OOM-tunnuslukuista nähtiin, ontologisille ominaisuuksille tulkittiin vastaajien kesken hyvin erilaisia keskinäisiä mielekkyyksiä. Faktorista nro. 1 voidaan kuitenkin nähdä, että interferenssin viitekehyksessä opiskelijat käyttävät jokseenkin johdonmukaisia olio-ontologioita. Tämä voi johtua siitä, että tietyn ontologisen näkökannan valitseminen selkeästi erottuvassa viitekehyksessä ankkuroi vastaajan

vastaamaan johdonmukaisesti muissa viitekehykseen viittaavissa väittämissä. Merkille pantavaa oli kuitenkin se, että näkökannan valittiin myös joissakin faktorin nro. 1 väittämissä, joilla ei ollut niinkään mitään tekemistä interferenssin ja rakosysteemin kanssa. Tästä voidaan päätellä, että opiskelijat ilmentävät yhtenäisiä kvanttiolio-ontologioita, mutta ne ilmenevät vain käytännöllisessä viitekehyksessä, eivätkä siten ole välttämättä jäsenyneitä teorian, vaan ulkonaisen ilmenemismuodon tasolla.

Faktorista nro. 1 myös huomataan että siinä esiintyy usein myös kvanttimekaniikan käsite "aaltofunktio". Myös muilla faktorisaatioilla, kuten kuuden faktorin reduktiolla, tunnistettiin vastaavanlaisia ryppäitä joissa voimakkaasti korostuu sellaiset faktorit joissa on voimakas ulkonaisesti tunnistettavissa oleva käsite kuten "aaltofunktio". Joissakin tapauksissa termiin liittyvät mielleyhtymät tuottivat voimakkaita ontologisia kannanottoja riippumatta väittämien ilmentämästä muusta ontologisesta sisällöstä. Tämä näkyi siinä, että väittämät joihin liittyi käsite aaltofunktio tuottivat huomattavasti polarisoituneempia kannanottoja kuin väittämät samoin ontologisin kategorioin ladattuina, mutta vailla käsitettä aaltofunktio.

Faktori nro. 2 : klassinen hiukkasolio-ontologia

Faktori nro. 2 käsitti seuraavat kyselylomakkeen väittämät:

- Elektronit ovat pistemäisiä hiukkasia, joilla on massa
- Elektronit ovat pistemäisiä ja yksilöityviä hiukkasia. Osumakohtien hajonta varjostimella johtuu siitä, että jokainen elektroni on sironnu raossa ja sen suunta on muuttunut satunnaisesti
- Fotonit ovat pistemäisiä hiukkasia, ja ne ovat periaatteessa jatkuvasti paikallistuneita
- Elektronisuihkussa eri elektronit interferoivat keskenään synnyttäen siten havaitut interferenssiraidat
- Elektroni on hiukkasmainen ja aina olemassaoleva. Sen aiheuttamat ilmiöt ovat satunnaistapahtumia, joiden todennäköisyys määräytyy aaltofunktiosta. Interferenssi syntyy, koska tapahtumiin liittyvä aaltofunktio on laaja-alainen ja superponoituva
- Valo koostuu fotoneista, jotka interferoivat keskenään synnyttäen siten havaitut interferenssiraidat
- Fotonit ovat pistemäisiä hiukkasia, joilla ei ole massaa

- Valo koostuu fotoneista, jotka ovat pistemäisiä ja yksilöityviä hiukkasia. Osumakohtien hajonta varjostimella johtuu siitä, että jokainen elektroni on sironnu raossa ja sen suunta on muuttunut satunnaisesti

Faktori nro. 2 vaikutti viittaavan naiviin hiukkasmaiseen kvanttiolio-ontologiaan. Faktorissa esiintyviä käsitteitä jotka yhdistivät sen väittämiä ja esiintyi usein olivat pistemäisyys, yksilöityvyys, massa, paikallistuvuuden ja olemassaolon mieli sekä suoranainen attribuutin “hiukkasmainen” käyttö kvanttiolio-ontologian kuvailussa. Tämä faktori yhdistää siis miltei kaikki klassiseen hiukkasontologiaan liittyvät ominaisuudet, joihin kvanttimekaniikka yhdistyy lainalaisuuksien tasolla muuttamatta klassisen fysiikan tiukkaa hiukkaskuvaa. Viitteitä muista kokonaisista olio-ontologioista ei ollut tunnistettavissa muissa faktoreissa, joka tekee faktorista nro. 2 erityisen muiden faktoreiden joukossa, joiden väittämiä yhdistävät lähinnä yksittäiset ontologiset ominaisuudet tai irralliset kvanttifysiikan käsitteet.

Kuten OOM -tunnusluvuista nähtiin, klassinen hiukkasontologiakuva ja siihen liittyvät ontologiset ominaisuudet eivät eriytyneet voimakkaasti tunnuslukujen voimakkuuksien tasolla, joka kertoo siitä, että opiskelijat tasapainottelivat kokonaisen hiukkasontologian hyväksymisen ja kieltämisen välillä suhteellisen tasaisesti. Tästä voidaan nähdä, että tasolla opiskelijat pystyvät erittelemään ja tunnistamaan klassisen hiukkasontologian ontologista rakennetta ainakin implisiittisellä tasolla. Se taas että arvioivatko opiskelijat olio-ontologian olevan kelvollinen kvanttiolio-ontologian kuvailussa on taas kokonaan toinen kysymys. OOM -tunnuslukujen perusteella kokonainen klassinen hiukkasolio-ontologia on ainakin jollakin tavalla edustettu opiskelijoiden tarjoamien kvanttiolio-ontologioiden joukossa.

Faktori nro. 3 : Heisenbergin epätarkkuusperiaate

Faktori nro. 3 käsitti seuraavat kyselylomakkeen väittämät:

- Varjostimelle syntyvien osumien keskinäinen hajonta määräytyy Heisenbergin epätarkkuusrelaation mukaan
- Varjostimelle syntyvän interferenssikuvion viivojen leveys määräytyy Heisenbergin epätarkkuusrelaatiosta
- Elektronien liikemäärä säilyy, mutta elektronit voivat poiketa satunnaisesti alkuperäisestä suunnastaan. Poikkeama Δx riippuu Heisenbergin epätarkkuusrelaation mukaan siitä, kuinka suuri on suihkuun kuuluvien elektronien liikemäärien vaihteluväli Δp

- Raossa, jonka leveys on Δx jokaisen elektronin liikemäärän muutos on Δp Heisenbergin epätarkkuusrelaation $\Delta p \Delta x \geq h$ määräämällä tavalla
- Elektronien radoissa ja liikemäärissä voi tapahtua satunnaisia ja ennakoimattomia muutoksia siten, että radan poikkeaman suuruudet voivat vaihdella määrällä Δx ja niihin liittyvät liikemäärän muutokset Δp noudattavat epätarkkuusrelaatiota $\Delta p \Delta x \geq h$
- Valo koostuu fotoneista, jotka eivät voi olla jatkuvasti olemassa olevia olioita, vaan ne realisoituvat ainoastaan vuorovaikutustapahtumassa. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton

Faktori nro. 3 sisälsi väittämiä joissa esiintyi kvanttimekaniikan käsite "Heisenbergin epätarkkuusperiaate". Faktorien sisältämät väittämät viittasivat hyvin erilaisiin ontologisiin ominaisuuksiin, mutta tästä huolimatta vastaaminen oli kyseisissä väittämissä yhdenmukaista, voimakkaana moodina Likert -arvo 3. Tästä vastausten pinoutumisesta ja ryppään muodostumisesta voidaan päätellä ulkonaisen ja sisällöllisesti haastavan käsitteen kuten Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen ennemminkin dominoivan vastaamista kuin väittämissä esiintyvät ontologiset ominaisuudet.

Faktorin nro. 3 väitteissä esiintyvän Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen käsitteen johtaminen huomattavan neutraaleihin vastauksiin (vastausten keskiarvo likimain kolme) voidaan tulkita epävarmuutena ja kyvyttömyytenä nähdä yhteyttä Heisenbergin epämääräisyysperiaatteen ja kaksoisrakokokeen ilmiöiden välillä. Näkökantaa tukee myös se, että avoimissa vastauskentissä lukuisat opiskelijat tunnustivat etteivät ymmärtäneet Heisenbergin epämääräisyysperiaatteen roolia väittämissä. Varsinaisia johtopäätöksiä opiskelijoiden ilmentämästä kvanttiolio-ontologioiden rakenteesta ei tästä syystä voida luotettavasti tehdä kyseiseen faktoriin nojaten. Tietyssä mielessä faktorin eriytymisessä voidaan nähdä samoja piirteitä kuin faktorissa nro. 1, jossa käsitteen aaltofunktio esiintyminen tuotti käsitteen sisältämien väittämien välillä tavallista havaittavampaa johdonmukaisuutta.

Faktori nro. 4 : Olemassaolo ja vuorovaikutus

Faktori nro. 4 käsitti seuraavat kyselylomakkeen väittämät:

- Valo koostuu fotoneista, jotka eivät voi olla jatkuvasti olemassa olevia olioita, vaan ne realisoituvat ainoastaan vuorovaikutustapahtumassa. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton
- Elektronit eivät voi olla jatkuvasti olemassa olevia olioita, vaan ne realisoituvat ainoastaan vuorovaikutustapahtumassa. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton
- Fotonit eivät ole oikeastaan jatkuvasti olemassa olevia olioita, mutta aaltofunktio määrää todennäköisyyden jolla ne realisoituvat tietyssä paikassa. Aaltofunktio käyttäytyy raossa aallon tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön
- Elektronit eivät ole oikeastaan jatkuvasti olemassa olevia olioita, mutta aaltofunktio määrää todennäköisyyden, jolla ne realisoituvat tietyssä paikassa. Aaltofunktio käyttäytyy raoissa aallon tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön

Faktori nro. 4 käsitti väittämiä jotka koskivat olioiden vuorovaikutusta ja olemassaoloa. Väittämiä yhdistää rakenne “...eivät ole oikeastaan jatkuvasti olemassa olevia olioita...”. Kuten OOM-tunnuslukujen yhteydessä mainittiin, kvanttiolio-ontologian ominaisuuteen “olemassaolo” viittaavia kysymyksiä yhdisti kömpelö artikulaatio suhteessa kvanttifysiikan yleiseen kielenkäyttöön, jota vastaajat myös kritisoivat. Olemassaolon puuttuminen kvanttiolio-ontologialta, saati miltään olio-ontologialta on arkilogiikan vastaista jos olemassaolo ymmärretään olion substantiaalisena eksistenssin merkityksessä. Kvanttimekaanisen olemassaolon käsitteellä ei kuitenkaan ole mitään tekemistä arkipäiväisen olemassaolon käsitteen kanssa.

Muiden olemassaoloon viittaavien väittämien tavoin väittämien keskiarvot olivat lähellä kolmea ($2,91 \pm 1,15$). Ainoastaan QM-1 kurssin vastaajissa tyyppiarvo oli jokin muu kuin kolme, vaihdellen yhden ja kahden välillä väittämästä riippuen. Keskiarvo oli myös tästä syystä väittämän keskiarvo merkittävästi alle kolmen ($2,36 \pm 0,94$). QM-1 kurssin opiskelijat suhtautuivat siis kategorisesti joustamattomammin kvanttiolio-ontologian olemassaolemattomuuteen ja realisoitumiseen vuorovaikutustapahtumassa. Ei ole selvää miksi opiskelijat attribuoivat kvanttiolio-ontologian olemassaolon välttämättömyyden vailla vuorovaikutuskontekstia niin korkealle. Filosofisesti näkökanta on luonteva ja yhteismitallinen olemassaolon käsitteen arkikäytön kanssa. Tällöin herää kysymys siitä, miksi KvaPer ja FKR-III kurssien vastaajat suhtautuvat optimistisemmin ns. jatkuvaan olemassaoloon.

On mahdollista että QM-1 kurssin vastaajat ilmaisevat voimakkaammin ontologisia näkökantojaan riippumatta siitä mikä on tiedon laatu. Avoimessa palautteessa QM-1 vastaajat esiintyivät huomattavasti

määrätietoisempina ja kriittisempinä kyselyä vastaan. Vaikka monet FKR-III kurssin vastaajista olivat opintovuosissa vanhempia QM-1 opiskelijoihin verrattuna, he ilmaisivat hyvin avoimesti epävarmuuttaan ja vuosien harjoittelemattomuutta kvanttifysiikan alueella, joka voi selittää miksi FKR-III ja KvaPer opiskelijoiden vastaukset olivat huomattavasti lähempänä toisiaan kuin QM-1 opiskelijoiden. Kautta linjan QM-1 opiskelijat vastasivat polarisoidummin kuin muut ryhmät, joka näkyy trendinä erityisen vakuuttavasti OOM -hajontalukujen suuruudesta verrattuna muihin ryhmiin.

Faktori nro. 5 : Heikko duaali

Faktori nro. 5 käsitti seuraavat kyselylomakkeen väittämät:

- Valon aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy vain siten, että ajatellaan vuorovaikutuksessa varjostimen kanssa sähkömagneettisesti
- Elektronien aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy vain siten, että ajatellaan elektronien olevan paikallistumattomia ja yksilöimättömiä olioita
- Elektronit ovat ei-pistemäisiä massa- ja varausjakaumia

Faktori nro. 5 sisälsi ainoastaan kolme väittämää, joista kaksi olivat identtisiä, olion paikallistuvuuteen liittyviä. Ainoa eroavaisuus oli, että väittämissä vaihteli käsiteltävä olio elektronin ja fotonin välillä. Kolmas väittämä koski ainoastaan elektronin spatiaalista luonnetta. Faktori on epämieliekäs tulkita erillisenä ontologisena kategoriana, vaikka se osaltaan osoittaa opiskelijoiden kvanttiolio-ontologian pysyvyyttä ja/tai eriytyvyyttä elektronin ja fotonin ontologisen luonteen välillä. Yhteys juuri elektronin spatiaaliseen luonteeseen ei kuitenkaan ole selkeä kvanttiolio-ontologian paikallistuvuuteen nähden, jonka takia on perustellumpaa tulkita faktori ”tyhjäksi” ontologisesta sisällöstä.

5.2.2. Historiallis-tieteellisten kvanttiolio-ontologia -mallien sovitusten vastauksiin

Erityisten kvanttiolio-ontologiamallien ilmenemistä vastaamisessa tutkittiin suorittamalla konfirmatorinen klusterianalyysi SPSS -ohjelmalla valitsemalla luvussa 4.5 esitetyt tiettyyn kvanttiolio-ontologiakategoriaan kuuluvat kysymykset ja tutkimalla ontologisten ominaisuuksien

suhteellista etäisyyttä toisistaan kyselyn vastausten perusteella. Etäisyydet olivat kategorioiden välillä kuitenkin niin suuria, ettei yhdestäkään mainituista kvanttiolio-ontologiamalleista löydetty viitteitä opiskelijoiden vastausstrategioissa. Jos kvanttiolio-ontologia -malleja tunnistettiin, niitä ei käytetty vastauksissa niin johdonmukaisesti, että ne eriytyisivät mielekkäästi faktorien tasolla.

5.3. Kyselylomake

OOM -tunnusluvut ovat itsessään mielenkiintoinen osoitus siitä, että millä tavoin kyselylomakkeen väitteitä voitaisiin operationalisoida ja mitata käsitteellistä ymmärtämistä yksittäisen ontologisen kategorian tasolla. Harmillisesti tässä tutkimuksessa huomattiin kolme keskeistä ongelmaa kyselylomakkeen rakenteeseen liittyen jotka rajoittavat käytetyn menetelmän toimivuutta. Ensimmäiseksi huomattiin jo esille tullut väitteiden sisältämien ontologisten kategorisaatioiden päällekkäisyys, jonka vaikutuksesta vastauksiin ja edelleen OOM -tunnuslukuihin ei voida olla varmoja. Kyseisen riippuvuuden ymmärtäminen vaatisi erityistä kyselyä, joka mittaisi ontologisten kategorioiden riippuvuutta toisistaan näiden esiintyessä väittämässä yhdenaikaisesti. Sisältöanalyysissa huomattiin eri ontologisiin ominaisuuksiin viittaavien kysymyksien risteävän ja tuottavan epämääräisiä ja ristiriitaisia kokonaisuuksia, jolloin mallien tunnistaminen tuli OOM -tunnuslukujen tasolla mahdottomaksi.

Toiseksi ongelmaksi voidaan tunnistaa vastaajien havaittu sekaannus mitattavien ontologisten kategorioiden käsitteellisestä sisällöstä. Ei ole perusteltua olettaa että opiskelijat ymmärtävät samat käsitteet ja termit kyselyn laatijan tarkoittamalla tavalla erityisesti kun kyse on aihealueesta, jonka opiskelijat myöntävät hallitsevansa puutteellisesti. Tämän ongelman ratkaisemiseksi väittämässä esiintyvien käsitteiden vastaavuussuhteet mitattaviin ontologisiin ominaisuuksiin tulisi kontrolloida ja kartoittaa jokaisen ryhmän tai jopa vastaajan osalta erikseen. Tämä epäilemättä olisi kohtuuttoman työläs ja aikaavievä prosessi, jonka takia tämän työn osalta siihen ei ryhdytty.

Kolmanneksi havaittu ongelma liittyi kyselyn suureen pituuteen. Kyselyn 77 kohdan vastaamiseen saattoi kulua jopa yli tunti. Vaikka tämä tarkoittaakin alle minuutin pohdinta-aikaa väittämää kohden, koko kyselyn suorittamiseen tarvittu aika ylittää ajan, jonka keskimääräinen ihminen pystyy säilyttämään valppautensa. Kun otetaan huomioon kuinka suuren määrän monimutkaisia ja käsitteellisesti hienovireisiä väittämiä opiskelija joutuu kyselyyn vastatessa arvioimaan, on selvää ettei ole perusteltua väittää opiskelijan kykenemään osoittamaan samanlaista huolellisuutta kysymyksen 1 kuin kysymyksen 77 osalta.

Yhtenä merkittävästi tuloksiin vaikuttavana tekijänä voidaan vanhassa kyselyssä tunnistaa myös muutamien väittämien ns. ulkoiset tekijät. Faktorin kolme tapauksessa huomattiin, että faktorien väittämissä esiintyvät tietyt käsitteet ohjaavat opiskelijoiden vastaamista. Merkittävimmät tällaiset tekijä oli faktorissa kaksi esiintyvä käsite aaltofunktio ja faktorissa kuusi esiintyvä käsite Heisenbergin epämääräisyysperiaate. Tällainen tulkinta nähtiin luonnolliseksi sillä perusteella, että faktorien sisältämät väittämät viittasivat hyvin erilaisiin ontologisiin ominaisuuksiin, mutta tästä huolimatta vastaaminen oli kyseisissä väittämissä yhdenmukaista. Tällöin oppilaat asettivat tietäen tai tiedostamatta itsensä ristiriitaan muissa väitteissä esiintyvien ontologisten ominaisuuksien kanssa. Väitteiden sisältämät ontologiset ominaisuudet eivät siis voineet olla ratkaisevia tekijöitä vastaamisessa, vaan jonkin toisen tekijän täytyi yhdistää faktorin väittämiä.

6. Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa on tarkasteltu fysiikan opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikan ontologisesta rakenteesta sekä heidän taipumuksistaan jäsentää kvanttifysiikan käsitteellistä aineista. Opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikasta hahmotettiin opiskelijoiden ilmaisemien kvanttiolio-ontologioiden kuvauksien kriittisen arvioinnin kautta. Näitä kuvauksia hankittiin teettämällä kvanttifysiikkaa opiskeleville kyselytutkimus, joka koostui kvanttifysiikan käsiterakennetta ilmentävistä ontologisista väittämistä. Vastauksien ontologisia näkökantoja arvioiden oli mahdollista ymmärtää opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikan todellisuuskuvasta, kvanttiolio-ontologioista ja ontologisesta rakenteesta.

Ontologisten ominaisuuksien mielekkyyden OOM -tunnusluvuista saatiin selville, että yksilöityvyyden, olemassaolon ja hiukkasmaisuuden ontologiset ominaisuudet olivat opiskelijoiden vastauksissa erityisen heikosti eriytyneitä. Opiskelijoiden käsityksissä näillä ominaisuuksilla ei siis keskeistä roolia sen suhteen miten kvanttifysiikan ontologinen rakenne tulisi ymmärtää. Paitsi ettei ominaisuuksilla nähty merkittävää roolia ontologisen rakenteen kannalta, itse käsitteiden ymmärryksessä oli epävarmuutta kvanttifysiikan teorian tasolla.

Tietyt kvanttifysiikan käsitteet aiheuttivat ilmiselvästi voimakasta epävarmuutta opiskelijoissa. Näistä päällimmäinen oli Heisenbergin epämääräisyysperiaate, joka käsitti yhden viidestä eksploratiivisen faktorianalyysin löytämästä faktorista. Aina kun kyselyn väittämässä esiintyi Heisenbergin epämääräisyysperiaate opiskelijat vastasivat väittämiin tavallista neutraalimmin. Monet opiskelijat ilmaisivat etteivät ymmärtäneet Heisenbergin epämääräisyysperiaatteen roolia osana kyselyä ja kaksoisrakokokeen viitekehystä. Kurssien välillä ei ollut eroa tämän epävarmuuden suhteen. Vastausten neutraaliudesta ja faktorin itseisestä muodostumisesta pääteltiin ulkonaisen ja sisällöllisesti haastavan käsitteen kuten Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen esiintymisen hallitsevan vastausten laatua ennemminkin kuin väittämässä esiintyvät ontologiset ominaisuudet. Samanlaista ankuroitumista oli myös havaittavissa aaltofunktio -käsitteessä, joka niin ikään vaikutti esiintyessään vastausten laatuun. Aaltofunktio -käsite ei niinkään tuottanut neutraaleja vastauksia, vaan ennemminkin loi positiivisia mielekkyyssafekteja, joihin opiskelijat tarttuivat riippumatta väittämän muusta ontologisesta sisällöstä.

Muista laveammin jakautuneiden OOM -tunnusluvukujen perusteella oli vaikeampi tehdä johtopäätöksiä vastaajien käsittämien kvanttiolio-ontologioiden ontologisista ominaisuuksista. Korkeiden hajontalukujen takia on mahdollista että opiskelijat käyttivät monenlaisia kvanttiolio-ontologia -malleja, joihin liittyy erilaiset ontologisten ominaisuuksien painotukset. Tällöin riippuen selitettävästä ilmiöstä opiskelijan

tuntemista lukuisista malleista vain kaikista mielekkäin aktivoituu sen sijaan että opiskelija selittäisi kaikki ilmiöt tietyllä ennalta ankkuroidun kvanttiolio-ontologia -mallin mukaisesti.

Mallien dynaamisen käytön näkökantaa tukee se, ettei löydettyjen faktorien perusteella opiskelijat tunnistanee tai soveltaneet opetuksessa käytettäviä historiallis-tieteellisiä kvanttiolio-ontologia -malleja kyselyyn vastatessa siinä määrin johdonmukaisesti, että väittämät olisivat muodostaneet yhtenäisiä ryppäitä faktorianalyyseissä. Historiallis-tieteellisistä kvanttiolio-ontologia -malleista opiskelijat tunnistivat ja osasivat soveltaa johdonmukaisesti ainoastaan klassisen fysiikan hiukkasontologia -mallia. Muihin kuin suoraan tähän malliin viittaavien väittämien tapauksessa kvanttiolio-ontologia -mallin mielekkyys ei eriytnyt niin konfirmatorisen kuin eksploratiivisen faktorianalyyseihin tasolla.

Heikko eriytyvyys faktorisaatiossa on mahdollista ymmärtää siten, että opiskelijat käyttävät ontologisia malleja joko tapauskohtaisesti tai ulkokohtaista vastausstrategioita soveltaen. Tämä ei välttämättä tarkoita sitä etteikö kvanttiolio-ontologia -malleja olisi käytetty sisäisesti johdonmukaisesti, mutta faktorisaation tasolla johdonmukaisuus olisi haastavaa havaita. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa sitä, että opiskelija käyttää yhden tapauksen kohdatessaan yhtä kvanttiolio-ontologia -mallia, toisessa toista. Kvanttiolio-ontologia -mallien aktivoituminen on siis riippuvainen viitekehyksestä, jolloin eriytyminen faktorisaation tasolla ei ollut mahdollista. Tällaisia dynaamisia kvanttiolio-ontologioita -malleja voitaisiin edelleen tutkia erilaisella kyselylomakkeella, jossa väittämien kategorisaatio ei tapahtuisi ominaisuuksien mukaan, vaan kvanttiolio-ontologia -mallien mukaan. Tällainen kategorisaatio tekisi mahdolliseksi tarkastella kuinka joustavasti opiskelijat tasapainottelevat eri kvanttiolio-ontologia -mallien välillä, mikä aktivoi tietyt selitysmallit ja kuinka pysyviä mallit ovat erilaisten kvanttifysiikan ilmiöiden selityksissä.

Tutkimuksen perusteella opiskelijoiden käsitys kvanttifysiikan ontologisesta rakenteesta on kokonaisuudessaan parhaimmillaankin horjuva. Tutkimuksen perusteella opetuksessa käytettävien historiallis-tieteellisten opetusmallien vaikuttavuus opiskelijoiden vastauksissa oli häviävän pieni. Nykyinen tapa opettaa kvanttifysiikkaa ei siis ilmeisesti rakenna merkityksellistä käsitteellistä ymmärrystä kvanttifysiikasta ja sen malleista.

Niin kvanttifysiikan ontologisena rakenteen kuin kvanttiolio-ontologia -mallien kuvailuissa esiintyi jollei suoranaista epätietoisuutta, niin vähintäänkin kontekstisidonnaista vaihtelevuutta. Opiskelijat eivät kysineet kvanttifysiikan olioiden olevan luonteeltaan unitaarisia ja perustavanlaatuisesti erilaisia klassisiin olio-ontologioihin nähden. Vaikka kvanttifysiikan opetus onkin kurssien osalta tuottanut opiskelijoita jotka formaalisti ymmärtävät kvanttifysiikkaa, tämä formaali taito ei välity kvanttifysiikan merkityksellisenä käsitteellisenä ymmärryksenä. Fysiikan, ja näin myös tieteellisen todellisuuskuvan

hahmottamisessa ei olla kurssin osalta tehty mitään merkittävää edistystä. Tätä huomiota vasten on syytä kiinnittää huomiota siihen, miten kvanttifysiikan opetusta järjestetään ja millä tavoin kvanttifysiikan opetusta tukee kvanttifysiikan käsitteellisen ymmärryksen kehitystä.

Viitteet

- [1] B. Cox, J. Forshaw ; *The quantum universe*, DaCapo press, 2011
- [2] Arthur Koestler (1972) ; *The Roots of Coincidence* ; Yhdysvallat ; Random House
- [3] J. Falk (2007) ; *Students' depictions of quantum mechanics: a contemporary review and some implications for research and teaching* ; lisensiaattityö ; Uppsalan yliopisto
- [4] R. Feynman (1965) ; *The Character of Physical Law* ; Modern Library ; ISBN 0-679-60127-9
- [5] T. Bethge & H. Niedderer (1996) ; *Students' conceptions in quantum physics* ; Preprint ; URL <http://didaktik.physik.uni-bremen.de/niedderer/download/15ajptbh.PDF>
- [6] C. Baily & N. D. Finkelstein (2009) ; *Development of quantum perspectives in modern physics* ; Physics Review Special Topics - Physics Education Research **5** ; 010106
- [7] I. Koponen (2014) ; *Fysiikan käsitteet ja käsiterakenteet* ; Helsingin yliopisto
- [8] I. Johnston, K. Crawford & P. Fletcher (1988), *Student difficulties in learning quantum mechanics*. International Journal of Science Education 20, 427-46
- [9] R. Muller & H. Wiesner (2002) ; *Teaching quantum mechanics on an introductory level* ; Am. J. Phys. 70 (3)
- [10] J. Ke, M. Monk, R. Duschl (2005) ; *Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models*, International Journal of Science Education Vol. 27, No. 13, 28, pp. 1571–1594
- [11] R. Hake (1998) ; *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand- student survey of mechanics test data for introductory physics courses* ; American Journal of Physics 66, 64
- [12] M. Heikkinen (2005) ; *Student teachers learning about the quantum nature of light and the photon concept: A case study of research based desingn of teaching in teacher education* ; University of Helsinki
- [13] T. Hofweber (2014) ; *"Logic and Ontology"*, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* ; Edward N. Zalta(ed.), URL <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/logic-ontology>
- [14] H. Gauch Jr (2003), *Scientific Method in Practice* ; Cambridge ; Cambridge University Press, pp 71–73

- [15] F. Balibar, J-M, Levy-Leblond (1990) ; *Quantics: Rudiments of Quantum Physics* ; North Holland
- [16] M. Jammer (1966) ; *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw Hill
- [17] J. Losee (2001) ; *A historical introduction to the philosophy of science*. Oxford University Press, Oxford
- [18] M. Ayers (1997) : *Locke: Ideal ja oliot* ; Otava, 2000
- [19] E. Nagel (1979) ; *The structure of science: problems in the logic of scientific explanation*. Routledge & Kegan, London
- [20] B. van Fraassen (1980) ; *The scientific image*. Clarendon Press. Oxford
- [21] F. Suppe (1977). *The structure of scientific theories*. University of Illinois Press. Illinois. USA
- [22] R. Giere (1988) ; *Explaining Science: A cognitive approach* ; University of Chicago Press, Chicago
- [23] J. Mehra (1982) ; *The Historical Development of Quantum Theory I* ; Springer-Verlag New York
- [24] J. Von Neumann (1932) ; *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press
- [25] D. Home & M. A. B. Whitaker (1992) ; Ensemble Interpretations of Quantum Mechanics: A Modern Perspective ; Physics Reports ; Review Section of Physics Letters 21 (1, No. 4) 223—317. North-Holland
- [26] C. Hoefer (2008) ; "*Causal Determinism*" ; Edward N. Zalta, ed. The Stanford Encyclopedia of Philosophy
- [27] Z. Xia (1992) ; *The existence of noncollision singularities in Newtonian systems* ; The Annals of Mathematics 2nd, Volume 135, Issue 3 , 411-468
- [28] P. Kleinman (2013) ; *Philosophy 101: From Plato and Socrates to to ethics and metaphysics, an essential primer on the history of thought*, (s. 124), Adams Media
- [29] A. Hobson (2005) ; *Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics courses* ; Am J of Physics, Jul 2005, 630-634
- [30] T. Denkmayr et. al. (2013) ; *Observation of a quantum Cheshire Cat in a matter wave interferometer experiment* ; Nat. Commun. 5, 4492

- [31] R. Corrêa et. al. (2015) ; *Quantum Cheshire Cat' as simple quantum interference* ;
New Journal of Physics, Volume 17, May 2015 ; IOP Publishing Ltd and Deutsche Physikalische Gesellschaft
- [32] E. Cataloglu, R. Robinett (2002) ; *Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career* ; American Journal of Physics, 70 (3), 238-251
- [33] M. Kuhlmann (2013) ; *Physicists debate whether the world is made of particles or fields—or something else entirely* ; Scientific American
- [34] M. A. de Gosson (2014) ; *Born–Jordan Quantization and the Equivalence of Matrix and Wave Mechanics* ; Julkaisematon, URL <https://arxiv.org/pdf/1405.2519.pdf>
- [35] F. J. Duarte (2014), *Quantum Optics for Engineers* ;CRC ; New York
- [36] G. Rainer (2000) ; *Effects of Visual Experience on the Representation of Objects in the Prefrontal Cortex* ; Neuron, Vol. 27, 179–189
- [37] M. Morgan & M. Morrison (1999) : *Models as mediators*
- [38] M. Morrison & M. S. Morgan (1999) : *Models as mediating instruments*
- [39] B. Thacker (2003) ; *Recent advances in classroom physics* ; Rep. Prog. Phys. 66, 1833 – 1864
- [40] L. McDermott & E. Redish (1999) ; *Resource Letter on Physics Education Research* ; American Association of Physics Teachers, 1999. ; To be published in The American Journal of Physics
- [41] K. Mannila et. al. (2001) ; *Building a picture of students' conceptions of wave- and particle-like properties of quantum entities* ; European journal of physics ; IOP publishing Ltd
- [42] R. Kidd et al. (1989) ; *Evolution of the modern photon*. Am. J. Phys. 57(1)
- [43] J. Metsämuuronen (2006) ; *Tutkimuksen tekemisen perusteet ihmistieteissä* ; Helsinki: International Methelp

Liite A: Kyselylomake



Kvanttifysiikan käsitetesti 2015

OHJEET

Tämän kyselyn tarkoituksena on tutkia opiskelijoiden käsityksiä kvanttifysiikan käsitteistä.

Vastaa kaikkiin kohtiin huolella, mutta älä katso apua kirjoista, netistä tms. Tehtävä palvelee tarkoitustaan vain silloin, kun vastaat siihen aidosti omien tietojesi pohjalta. (Testin tuloksia käytetään tutkimustarkoituksissa.)

Asiallisesti ja loppuun asti vastaamalla tehtävästä saa yhtä laskuharjoitustehtävää vastaavan pistemäärän (2p). Aikaa testin täyttämiseen kuluu keskimäärin 30 minuuttia.

* Opiskelijanumero
(laskaripisteitä varten, tulokset
käsitellään muuten
anonyyminä)

Kyllä Ei

* Vastauksiani voidaan käyttää anonyyminä tutkimuksen tekemiseen

☐ ☐

KYSYMYKSET

A: Seuraavassa osiossa esitetään muutamia väitteitä liittyen elektroneihin ja valoon. Ota kantaa, miten väitteet kuvaavat mielestäsi nykyfysiikan käsityksiä elektroneista ja valosta.

Käytä numerointia: 1=erittäin huonosti, 2=jokseenkin huonosti, 3=riittävän hyvin ollakseen totta, 4=jokseenkin hyvin, 5=erittäin hyvin.

	1	2	3	4	5
Elektronit ovat pistemäisiä hiukkasia, joilla on massa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronin tarkan paikan ja radan määrittäminen on mahdotonta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit ovat ei-pistemäisiä, laaja-alaisia ja aaltomaisia olioita	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit ovat ei-pistemäisiä massa- ja varausjakaumia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit ovat paikallistuneita, mutta eivät jatkuvasti olemassa olevia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit ovat pistemäisiä hiukkasia, joilla ei ole massaa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit liikkuvat hyvin määriteltäviä ratoja pitkin	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit ovat pistemäisiä hiukkasia, ja ne ovat periaatteessa jatkuvasti paikallistuneita	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit ovat ei-pistemäisiä, laaja-alaisia olioita, mutta ne ovat periaatteessa jatkuvasti paikallistuneita	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit ovat ei-pistemäisiä, laaja-alaisia olioita, mutta ne eivät ole edes periaatteessa jatkuvasti paikallistuneita	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit ovat paikallistuneita, mutta eivät jatkuvasti olemassa olevia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotoni ei ole hiukkanen, vaan pikemminkin eräänlainen "energiapaketti"	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronia voidaan ajatella joko hiukkasena tai aaltona riippuen siitä millaisia mittauksia tehdään	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valon voidaan ajatella koostuvan fotoneista riippuen siitä millaisia mittauksia tehdään	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vain valon aiheuttamia ilmiöitä voidaan kuvata fotoni-mallia käyttäen, valoa sinänsä on ajateltava klassisena kenttänä	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Vain elektronin aiheuttamia ilmiöitä voidaan kuvata aalto-mallia käyttäen, elektroni sinänsä on ajateltava klassisena hiukkasena	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

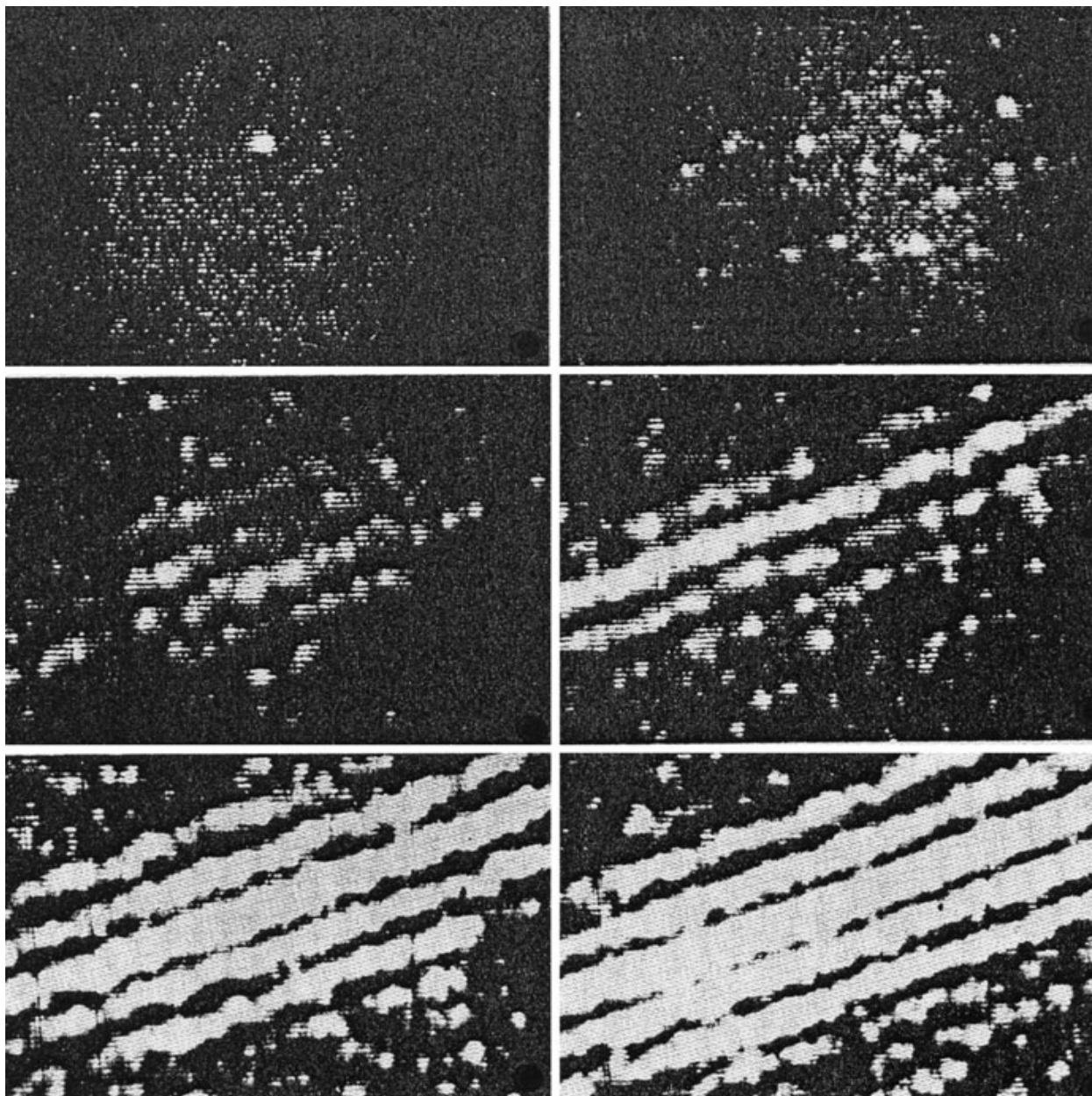
B: Usein puhutaan joko elektronien tai valon "hiukkasluonteesta" ja "aaltoluonteesta". Selitä, mitä tällä tarkoitetaan?

Mitkä seuraavista kokeista ja havainnoista ovat mielestäsi sellaisia, joihin perustuu elektronien/fotonien tunnistaminen hiukkasiksi (merkitse H) tai aalloiksi (merkitse A). Jos kumpikin sopii, merkitse molemmat (M). Ellei väite mahdollista tunnistamista sen paremmin hiukkaseksi kuin aalloksikaan, merkitse "ei kumpikaan" (E).

	H	A	M	E
Kokeissa voidaan havaita elektronien paikallistuvan esim. valokuvauslevylle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kapean raon läpäisseiden elektronien myöhemmät havaintopisteet (esim. valokuvauslevyllä) voivat olla jakautuneet laajallekin alueelle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kapean raon läpäisseiden elektronien myöhemmät havaintopisteet (esim. valokuvauslevyllä) muodostavat interferenssikuvion	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kokeissa voidaan havaita elektronien jättämä ionisaatiojälki kuplakammioon	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energian ja liikemäärän voidaan todeta säilyvän törmäyskokeissa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronien lukumäärä voidaan laskea sopivalla laskurilla tai ilmaisimella	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronien voidaan todeta vuorovaikuttavan keskenään	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronin varaus voidaan mitata	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronin massa voidaan mitata	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kokeissa voidaan havaita fotonien paikallistuvan esim. valokuvauslevylle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Energian ja liikemäärän voidaan todeta säilyvän fotonin ja elektronin törmätessä	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonien lukumäärä voidaan laskea sopivalla laskurilla tai ilmaisimella	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tietyn energian omaava fotonisuihku voi irrottaa metallista elektroneja, joilla on hyvin määritelty maksimienergia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

C: Elektronilähteestä tuleva, intensiteetiltään heikko, elektronisuihku kohdistetaan kahdesta vierekkäisestä kapeasta raosta koostuvaan rakosysteemiin, jonka jälkeen elektronisuihku osuu raosta kaukana sijaitsevaan, varjostimella olevaan, valokuvauslevyyn. Alla olevassa kuvasarjassa on esitetty, kuinka valokuvauslevy valottuu asteittain elektronisuihkun osuessa siihen. Ensimmäinen kuva vasemmalla ylälaidassa esittää tilannetta heti raon avaamisen jälkeen, oikea alakulma taas kuvaa tilannetta pitkän ajan kuluttua.

Jos elektronien asemasta käytetään intensiteetiltään äärimmäisen heikkoa valoa, saadaan oleellisesti samanlainen tulos kuin kuvissa on esitetty.



I. Selitä lyhyesti, mitä ensimmäisessä kuvassa havaitaan ja miten siinä näkyvät vaaleat "täplät" selittyvät. Mitä kuvan esittämä tilanne mielestäsi kertoo elektroneista/valosta?

Seuraavassa on esitetty joitakin kysymyksiä liittyen siihen, miten varjostimella havaitut ilmiöt selittyvät. Vastaa lyhyesti esitettyihin kysymyksiin niiden alla olevaan tilaan ja vastaa monivalintakysymyksiin. Pyri keskittymään vastauksessasi mielestäsi oleellisimpiin piirteisiin.

Jokaiseen kysymykseen liittyy myös muutamia väitelauseita. Mikään niistä ei ole välttämättä täysin oikein tai täysin väärin. Arvioi väitteiden paikkansapitävyyttä asteikolla 1-5. Käytä numeroita: 5=erittäin hyvin, 4=jokseenkin hyvin, 3=riittävän hyvin ollakseen totta 2=jokseenkin huonosti, 1=erittäin huonosti

I.1. Elektronisuihkun tapauksessa yksittäiset osumat ja niiden hajonta ovat osoituksia siitä, että

	1	2	3	4	5
Elektronit ovat pistemäisiä ja yksilöityviä hiukkasia. Osumakohtien hajonta varjostimella johtuu siitä, että jokainen elektroni on sironnu raossa ja sen suunta on muuttunut satunnaisesti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit ovat pistemäisiä, mutta eivät yksilöityviä olioita. Osumakohtien hajonta varjostimella selittyy sillä, että yksilöimätön olio ei voi koskaan paikallistua ennakoitavalla tavalla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronien aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit eivät voi olla jatkuvasti olemassa olevia olioita, vaan ne realisoituvat ainoastaan vuorovaikutustapahtumassa. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronien aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy vain siten, että ajatellaan elektronien olevan paikallistumattomia ja yksilöimättömiä olioita	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I.2. Intensiteetiltään heikon valon tapauksessa yksittäiset osumat ja niiden hajonta ovat osoituksia siitä, että

	1	2	3	4	5
Valo koostuu fotoneista, jotka ovat pistemäisiä ja yksilöityviä hiukkasia. Osumakohtien hajonta varjostimella johtuu siitä, että jokainen elektroni on sironnu raossa ja sen suunta on muuttunut satunnaisesti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valo koostuu fotoneista, jotka ovat pistemäisiä, mutta eivät yksilöityviä olioita. Osumakohtien hajonta varjostimella selittyy sillä, että yksilöimätön olio ei voi koskaan paikallistua ennakoitavalla tavalla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valon aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valo koostuu fotoneista, jotka eivät voi olla jatkuvasti olemassa olevia olioita, vaan ne realisoituvat ainoastaan vuorovaikutustapahtumassa. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy sillä, että yksittäistapahtuma on ennakoimaton	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valon aiheuttama ilmiö, varjostimen valottuminen, on paikallistunut. Valottuneiden pisteiden hajonta selittyy vain siten, että ajatellaan vuorovaikutuksessa varjostimen kanssa sähkömagneetti	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

II. Selitä lyhyesti, mitä em. kuvasarjan viimeisessä kuvassa (oikea alalaita) havaitaan ja miten siinä näkyvät vaaleat "raidat" selittyvät. Mikä prosessi tai tapahtumasarja saa ilmiön aikaan? Mitä tämän kuvan esittämä tilanne kertoo elektroneista/valosta?

II.1. Intensiteetiltään heikon valon tapauksessa interferenssi-ilmiö on osoitus siitä, että

	1	2	3	4	5
Valo koostuu fotoneista, jotka interferoivat keskenään synnyttäen siten havaitut interferenssiraidat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Interferenssi-ilmiö selittyy valon tapauksessa täysin klassisesti sähkömagneettisen kentän ominaisuuksien kautta, vain "rakeisuus" vaatii kvanttimekaanisen selityksen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Todellisuus on "dualistinen" siten, että klassinen kenttäkuvailu on yhteismitaton kvanttimekaanisen hiukkaskuvailun kanssa ja molempia ei voida käyttää ristiriidattomasti yhtäaikaan	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valo koostuu pistemäisistä fotoneista, jotka ohjautuvat eri kohtiin aaltofunktion määräämällä tavalla. Kunkin fotonin aaltofunktio käyttäytyy raoissa aalln tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön. (Ts. "fotoni menee molempien aukkojen läpi")	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit eivät ole oikeastaan jatkuvasti olemassa olevia olioita, mutta aaltofunktio määrää todennäköisyyden jolla ne realisoituvat tietyssä paikassa. Aaltofunktio käyttäytyy raoissa aalln tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

II.2. Elektronisuihkun tapauksessa interferenssi-ilmiö on osoitus siitä, että

	1	2	3	4	5
Elektronisuihkussa eri elektronit interferoivat keskenään synnyttäen siten havaitut interferenssiraidat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Interferenssi-ilmiö vaatii elektronien tapauksessa kvanttimekaanisen selityksen, joka pohjautuu kunkin elektronin aaltofunktioon ja sen interferenssiin itsensä kanssa. ("elektroni menee kummankin aukon läpi")	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit ohjautuvat eri kohtiin aaltofunktion määräämällä tavalla. Aaltofunktio käyttäytyy raoissa aalln tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronit eivät ole oikeastaan jatkuvasti olemassa olevia olioita, mutta aaltofunktio määrää todennäköisyyden, jolla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

nerealisoituvat tietyssä paikassa. Aaltofunktio käyttäytyy raossa aallon tavoin synnyttäen siten havaitun interferenssi-ilmiön. Elektronit ovat jatkuvasti olemassa olevia olioita, mutta ne ovat jollain tapaa paikallistumattomia tai laaja-alaisia varausjakaumia. Koska elektroni on laaja-alainen, se tuntee molemmat raot ja interferoi itsensä kanssa

☐ ☐ ☐ ☐ ☐

III. Selitä kuvien esittämä tapahtumien kulku elektronien tapauksessa käyttämällä käsitteitä *satunnaistapahtuma* (tai todennäköisyys) ja *aaltofunktio*. Mitä aaltofunktio pyrkii kuvaamaan kuvan esittämässä tapauksissa? Voit käyttää hyväksi myös kaaviota ja kuvia selityksessäsi. Pyri kuvailemaan oleelliset tapahtumat mahdollisimman oikein ilmiötasolla.

III.1. Elektronisuihkun tapauksessa interferenssi-kuvion raitojen vähittäinen muodostuminen yksittäisistä pisteistä osoittaa, että

	1	2	3	4	5
Aaltofunktio ei oikeastaan kuvaa elektronia sinänsä, vaan havaintotapahtumaa tai tietoa mittauksessa saatavasta informaatiosta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Havainnon (tai mittaustapahtuman) paikallistuminen on tilastollinen, ennakoimaton, ilmiö ja aaltofunktio määrää siihen liittyvän todennäköisyysjakauman	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektroni on hiukkasmainen ja aina olemassaoleva. Sen aiheuttamat ilmiöt ovat satunnaistapahtumia, joiden todennäköisyys määräytyy aaltofunktiosta. Interferenssi syntyy, koska tapahtumiin liittyvä aaltofunktio on laaja-alainen ja superponoituva	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aaltofunktio kuvaa elektronia, joka on itsessään laaja-alainen ja noudattaa lineaarisen superposition periaatetta. Pisteiden satunnainen jakautuminen alussa osoittaa vain sen, että havaintotapahtuma on aito satunnaistapahtuma	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

III.2. Intensiteetiltään heikon valon tapauksessa interferenssi-kuvion raitojen vähittäinen muodostuminen yksittäisistä pisteistä osoittaa, että

	1	2	3	4	5
Fotonit ovat paikallistumattomia tai laaja-alaisia olioita. Koska fotonit ovat paikallistumattomia, siihen liittyvää interferenssi-ilmiötä raossa voidaan kuvata aaltofunktiolla, joka käyttäytyy raossa aallon tavoin	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aaltofunktio määrää todennäköisyyden, jolla fotonit paikallistuvat tietyssä paikassa	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fotonit ovat paikallistumattomia tai laaja-alaisia olioita. Fotoniin liittyvää interferenssi-ilmiötä raossa voidaan kuvata todennäköisyyskentällä, joka on superponoituva. K.o. kenttä määrää milloin ja missä paikallistumaton fotonit paikallistuu (mitataan)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
SMG-kentän ja varjostimen vuorovaikutuksessa energian ja liikemäärän muutokset ovat satunnaisia, ennakoimattomia ja paikallistuneita ilmiöitä. Interferenssiä voidaan kuvata todennäköisyyskentällä, joka on superponoituva. Tn.kenttä määrää miten ilmiö tapahtuu	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

IV. Miten Heisenbergin epämääräisyysperiaate liittyy kuvien esittämään tilanteeseen? Mitä kuvissa havaittavia piirteitä se selittää (jos mitään)?

VI.1. Elektronisuihkun kulkiessa kapean raon lävitse... [miten jatkuu]

	1	2	3	4	5
Raossa, jonka leveys on Δx jokaisen elektronin liikemäärän muutos on Δp Heisenbergin epätarkkuusrelaation $\Delta p \Delta x > h$ määräämällä tavalla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronien liikemäärä säilyy, mutta elektronit voivat poiketa satunnaisesti alkuperäisestä suunnastaan. Poikkeama Δx riippuu Heisenbergin epätarkkuusrelaation mukaan siitä, kuinka suuri on suihkuun kuuluvien elektronien liikemäärien vaihteluväli Δp	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronien radoissa ja liikemäärissä voi tapahtua satunnaisia ja ennakoimattomia muutoksia siten, että radan poikkeaman suuruudet voivat vaihdella määrällä Δx ja niihin liittyvät liikemäärän muutokset Δp noudattavat epätarkkuusrelaatiota $\Delta p \Delta x > h$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronin paikan epämääräisyys Δx ja vastaavasti sen liikemäärän epämääräisyys Δp vaihtelevat koko ajan mutta määrättyvät Heisenbergin relaation mukaisesti $\Delta p \Delta x > h$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Elektronin tiedetään paikallistuneen rako, jonka leveys on Δx . Mitä kapeampi rako on, sitä suurempi on todennäköisyys sille, että elektronin liikemäärän muutos on suuri. Liikemäärien muutokset ovat jakautuneet s.e. vaihteluväli on Δp ; $\Delta p \Delta x > h$ mukaan	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

VI.2. Intensiteetiltään äärimmäisen heikon valon kulkiessa kapean raon lävitse... [miten jatkuu]

	1	2	3	4	5
Varjostimelle syntyvien osumien keskinäinen hajonta määräytyy Heisenbergin epätarkkuusrelaation mukaan	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Varjostimelle syntyvän interferenssikuvion viivojen leveys määräytyy Heisenbergin epätarkkuusrelaatiosta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Varjostimelle muodostuvien yksittäisten pisteiden koko määräytyy Heisenbergin relaatiosta	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valon tapauksessa varjostimella havaittavien osumien ja interferenssikuvion mitään piirteitä ei voida ymmärtää Heisenbergin epätarkkuusrelaation avulla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Tilanne on oleellisesti samanlainen kuin aiemmassa kysymyksessä VI.1 jos vain elektronien asemasta ajatellaan fotoneita	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

VII. Mitkä ovat mielestäsi oleelliset erot, kun verrataan rakojen läpisseen elektronisuihkun ja valon käyttäytymistä ja niiden valokuvaislevyllä aiheuttamia havaittavia ilmiöitä?

Muuta kommentoitavaa:

TIETOJEN LÄHETYS

Tallenna

© Eduix Oy